

Juan Monjo Carrió
Luis Maldonado Ramos

**Patología y técnicas de intervención
en estructuras arquitectónicas**

Agradecimientos a:

- *Luis Sobrón y Marta Martín, Arquitectos hoy y alumnos cuando se empezó esta monografía, por su ayuda en la redacción de los capítulos 2, 4, y 6 pues aportan la visión de los alumnos fundamental para no perder el carácter docente que queríamos dar a este libro.*
- *José Luis García Valderas,*
- *Ángel Cesar Martínez-Conde Lapeña,*
- *Leopoldo Villadiego Correo por su participación en la elaboración de la documentación gráfica.*
- *Almudena López Díaz, por su trabajo de orden y tratamiento de manuscritos.*
- *Juan Antonio Torres, editor, por la paciencia que ha tenido hasta llegar a la publicación de este trabajo.*

PRÓLOGO

El presente libro nace con la intención de poner a disposición del lector la metodología propia del campo de la intervención en estructuras arquitectónicas. Aunque su vocación inicial es principalmente docente, creemos que también resultará de utilidad para los profesionales que deseen tener a mano un panorama organizado y analítico de las soluciones empleadas para afrontar los proyectos de intervención en estructuras de edificios.

Al ser concebido dentro del marco de los conceptos teóricos de la asignatura de Oficio del Arquitecto, el texto no se ocupa del cálculo de las soluciones estudiadas, sino que contempla exclusivamente aquellos procesos y elementos implicados en la construcción y el diseño de las mismas. La asignatura de referencia, perteneciente al último año del Plan Nuevo de la Escuela de Arquitectura de Madrid, pretende dotar a los alumnos de los conocimientos necesarios para ejercer su profesión dentro de los caminos y de las modalidades actuales que ésta les ofrece en nuestro país, tales como son, además de la redacción de proyectos de obra nueva, todos aquellos campos relacionados con la restauración y la rehabilitación de edificios, el análisis patológico, la inspección técnica, la conservación y mantenimiento, el control de calidad y la valoración y promoción inmobiliaria.

En el momento actual, la conservación y restauración de edificios constituye una parte verdaderamente esencial de la actividad profesional en España (y en general en toda Europa), dándose sin embargo la paradoja de la escasa consideración de que estos campos gozan en los planes de estudios oficiales; la asignatura de Oficio del Arquitecto contribuye en cierta medida a paliar esa falta de formación, pero sólo puede ser adecuadamente rentabilizada si cuenta con un material de apoyo capaz de suplir las lagunas que necesariamente presentará por una simple carencia de tiempo.

La conservación y restauración de edificios presuponen el conocimiento y la comprensión de los procesos patológicos y del diseño de soluciones constructivas para la reparación, lo que a menudo escapa de los límites de la formación convencional. Estos procedimientos, en efecto, pueden ser perfeccionados e incluso aprendidos por el profesional durante su etapa inicial de formación práctica, pero podrían verse sustancialmente mejorados por la correcta fundamentación metodológica y el estudio de sus contenidos durante la carrera.

Favorecer este estudio es el objetivo del texto que el lector tiene en sus manos, y que se plantea como un discurso dosificado y accesible de cara al estudiante de arquitectura, pero mirando también hacia el profesional interesado en organizar científicamente los conceptos de que debe disponer en su labor cotidiana.

Juan Monjo Carrió y Luis Maldonado Ramos

INDICE

CAPÍTULO 1. CONCEPTOS GENERALES

1.	INTRODUCCION	17
2.	TIPOS ESTRUCTURALES	19
2.1.	CIMENTACIONES Y CONTENCIONES	19
2.1.1.	Muros de contención	19
2.1.2.	Cimentación superficial	19
2.1.3.	Cimentación profunda	20
2.2.	OBRAS DE FABRICA	21
2.2.1.	Muros y pilastras	21
2.2.2.	Columnas y arcos	22
2.2.3.	Bóvedas,	22
2.3.	ESTRUCTURAS DE MADERA	22
2.3.1.	Pilares y vigas	23
2.3.2.	Forjados unidireccionales	23
2.3.3.	Cerchas	23
2.4.	ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN	24
2.4.1.	Estructuras verticales	24
2.4.2.	Estructuras horizontales	24
2.5.	ESTRUCTURAS METÁLICAS	25
2.5.1.	Forjados	25
2.5.2.	Pilares y vigas,	25
2.5.3.	Formas de cubierta	25
3.	PROCESOS PATOLOGICOS POSIBLES	27
3.1.	PROCESOS MECÁNICOS	27
3.1.1.	Deformaciones	27
3.1.2.	Roturas	29
3.2.	PROCESOS FÍSICOS	33
3.3.	PROCESOS QUÍMICOS	34
3.3.1.	Corrosión	34
3.3.2.	Erosión química	35
3.3.3.	Erosión biológica	36
4.	DIAGNOSTICO	40

CAPÍTULO 2. CIMENTACIONES

1.	GENERALIDADES	45
2.	IDENTIFICACIÓN DE LOS DAÑOS	46
2.1.	ASIENTOS	47

2.2.	GIROS Y DESPLOMES	48
2.3.	GRIETAS Y FISURAS	48
2.4.	DESNIVELES Y FLECHAS	49
3.	DETERMINACIÓN DE LAS CAUSAS	50
3.1.	ERRORES DE PROYECTO	50
3.1.1.	Errores de diseño	50
3.1.2.	Errores de cálculo	50
3.1.3.	Desconocimiento del suelo	50
3.2.	CALIDAD Y DURABILIDAD DE LOS MATERIALES	52
3.3.	DEFECTOS DE EJECUCIÓN	52
3.4.	ALTERACIÓN DE LA COMPETENCIA DE UN TERRENO	53
3.4.1.	Descenso del nivel freático	53
3.4.2.	Socavaciones y arrastres	53
3.4.3.	Deformación del terreno	53
3.4.4.	Alteración del terreno por vibraciones o percusión	55
3.5.	CAMBIO EN LAS CONDICIONES DE USO DEL EDIFICIO	55
4.	TÉCNICAS DE INTERVENCIÓN	56
4.1.	TRABAJOS PREVIOS	56
4.1.1.	Proceso de información	56
4.1.2.	Proyecto de intervención	58
4.1.3.	Ejecución de la intervención	59
4.2.	ACTUACIONES EN EL TERRENO	60
4.2.1.	Aplicaciones	61
4.2.2.	Sistemas de actuación en el terreno	63
4.2.3.	Drenajes	67
4.2.4.	Armados	67
4.3.	RECALCES DE CIMENTACIONES SUPERFICIALES	67
4.3.1.	Recalces superficiales	67
4.3.2.	Recalces profundos	80
4.4.	RECALCES DE CIMENTACIONES PROFUNDAS	93
4.4.1.	Actuaciones sobre el terreno	95
4.4.2.	Construcción de nuevos pilotes	95

CAPÍTULO 3. OBRAS Y FÁBRICA

1.	DEFINICIONES	101
1.1.	MUROS	101
1.2.	ARCOS	103
1.3.	BÓVEDAS Y CÚPULAS	104
1.4.	LA CONSTRUCCIÓN CON TIERRA	104
1.4.1.	Breve análisis histórico de los sistemas constructivos con tierra	105

1.4.2.	Tipología de las construcciones con tierra	107
1.5.	LA CONSTRUCCIÓN CON LADRILLO	114
1.5.1.	Breve recorrido histórico desde Roma hasta nuestros días	115
1.5.2.	Tipología constructiva	121
1.6.	LA CONSTRUCCIÓN CON PIEDRA	122
1.6.1.	Tipología constructiva con el uso de la piedra	123
2.	LESIONES Y SUS CAUSAS	129
2.1.	LESIONES FÍSICAS	129
2.2.	LESIONES QUÍMICAS	129
2.3.	LESIONES MECÁNICAS	131
2.3.1.	Deformaciones	131
2.3.2.	Roturas	132
3.	TECNICAS DE REPARACION	138
3.1.	MUROS	138
3.1.1.	Reparación de deformaciones	139
3.1.2.	Roturas	145
3.2.	ARCOS	150
3.2.1.	Reparación de deformaciones	150
3.2.2.	Reparación de roturas	154
3.2.3.	Reparación del efecto	155
3.3.	BÓVEDAS	155
3.3.1.	Reparación de deformaciones	155

CAPÍTULO 4. SISTEMAS ESTRUCTURALES DE MADERA

1.	GENERALIDADES	163
2.	ESTRUCTURA DE LA MADERA	164
3.	ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS EN MADERA	165
3.1.	CIMENTACIÓN	165
3.2.	FORJADOS	167
3.3.	CUBIERTA	168
3.4.	CARPINTERÍA	170
4.	DAÑOS EN LA MADERA	171
4.1.	AGENTES ABIÓTICOS	171
4.1.1.	Malformación	171
4.1.2.	Fuego	172
4.1.3.	Cambios de humedad	173
4.1.4.	Agentes climáticos	173
4.1.5.	Otros agentes	174
4.2.	AGENTES BIÓTICOS	175
4.2.1.	Hongos	175

4.2.2.	Insectos	177
4.2.3.	Xilófagos marinos	180
4.2.4.	Otros	180
5.	TRATAMIENTOS PREVENTIVOS DE LA MADERA	180
5.1.	PREVENCIÓN	180
5.2.	TRATAMIENTOS SEGÚN EL TIPO DE SUSTANCIA	181
5.2.1.	Hidrosolubles	182
5.2.2.	En disolvente orgánico	182
5.2.3.	Hidrodispersables o emulsiones	183
5.2.4.	Orgánicos naturales o creosotas	183
5.3.	TRATAMIENTOS SEGÚN LA PENETRACIÓN DE LA SUSTANCIA PROTECTORA	183
5.3.1.	Impregnaciones	183
5.3.2.	Imprimaciones	183
5.3.3.	Barnices	184
5.3.4.	Lásures	184
5.4.	TRATAMIENTOS SEGÚN SU FORMA DE APLICACIÓN ...	184
5.4.1.	Pincelado	184
5.4.2.	Pulverizado	184
5.4.3.	Inmersión breve	185
5.4.4.	Inmersión prolongada	185
5.4.5.	Inmersión caliente-fría	185
5.4.6.	Ósmosis o difusión	185
5.4.7.	En autoclave	185
5.4.6.	Inyección	186
6.	TRATAMIENTOS CURATIVOS DE LA MADERA	186
6.1.	GENERALIDADES	186
6.2.	TRATAMIENTOS SEGÚN EL AGENTE CAUSANTE DE LA DEGRADACIÓN	187
6.2.1.	Carcoma	187
6.2.2.	Termitas subterráneas	187
6.2.3.	Termitas de madera seca	187
6.2.4.	Hongos	188
6.2.5.	Fuego	188
6.2.6.	Agentes climáticos	189
7.	TÉCNICAS DE REPARACIÓN	189
7.1.	SUSTITUCIÓN	189
7.1.1.	Sustitución total	189
7.1.2.	Sustitución parcial	190
7.2.	SUSTITUCIÓN FUNCIONAL	190
7.2.1.	Sustitución funcional de elementos lineales	190
7.2.2.	Sustitución funcional de forjados	191
7.3.	CONSERVACIÓN	192

7.3.1.	Técnicas de refuerzo	192
7.3.2.	Técnicas de consolidación	193
7.3.3.	Refuerzo de perfilera metálica	198
7.3.4.	Armado	198
7.3.5.	Zunchado	199
7.3.6.	Atirantado y postensado	199
7.4.	CONSOLIDACIÓN	200
7.5.	REINTEGRACIÓN	200

CAPÍTULO 5. ESTRUCTURAS METÁLICAS

1.	ANTECEDENTES	207
1.1.	ACEROS USADOS EN CONSTRUCCIÓN	207
1.2.	ELEMENTOS	210
1.2.1.	Soportes	210
1.2.2.	Vigas y viguetas	210
1.2.3.	Formas trianguladas	211
1.2.4.	Tirantes	211
1.3.	SISTEMAS Y TÉCNICAS DE UNIÓN	211
1.3.1.	Roblonado	212
1.3.2.	Atornillado	213
1.3.3.	Soldadura	213
1.3.4.	Anclajes	215
2.	PROCESOS PATOLOGICOS	216
2.1.	RELATIVOS AL MATERIAL	216
2.1.1.	Rotura frágil	216
2.1.2.	Rotura por fatiga	216
2.1.3.	Desgarro laminar	217
2.1.4.	Corrosión	218
2.2.	RELATIVOS AL PROCESO	219
2.2.1.	Errores de proyecto	220
2.2.2.	Errores de ejecución	224
2.2.3.	Errores de mantenimiento	225
2.3.	SÍNTOMAS	226
3.	TECNICAS DE REPARACION	227
3.1.	DIAGNÓSTICO PREVIO	227
3.2.	PILARES	228
3.2.1.	Refuerzo metálico	228
3.2.2.	Refuerzo con hormigón	228
3.3.	VIGAS	231
3.3.1.	Deformación excesiva	231

3.3.2.	Tensión excesiva	232
3.3.3.	Refuerzos	232
3.4.	FORJADOS	236
3.4.1.	Refuerzo metálico	237
3.4.2.	Forjado mixto	238
3.5.	UNIONES	239
3.5.1.	Roblonado / atornillado	239
3.5.2.	Soldadura	239
3.5.3.	Articulaciones	240
3.6.	LESIÓN DEL MATERIAL	240
3.6.1.	Lesiones mecánicas	240
3.6.2.	Lesiones químicas	241
4.	MEDIDAS DE PREVENCIÓN	241
4.1.	DEL MATERIAL	242
4.1.1.	Prevención de lesiones mecánicas	242
4.1.2.	Prevención de lesiones químicas	243
4.2.	DEL ELEMENTO CONSTRUCTIVO	243
4.2.1.	Prevención de deformaciones	244
4.2.2.	Prevención de rotura de uniones	244

CAPÍTULO 6. SISTEMAS ESTRUCTURALES DE HORMIGÓN ARMADO

1.	GENERALIDADES	249
2.	CAUSAS DE LOS PROCESOS PATOLÓGICOS	250
2.1.	DEFECTOS DE DISEÑO Y CÁLCULO	250
2.1.1.	Errores de concepto del funcionamiento de la estructura	250
2.1.2.	Errores en la evaluación de las acciones	250
2.1.3.	Errores en el establecimiento de hipótesis de carga	250
2.1.4.	Errores en el cálculo de los esfuerzos	251
2.1.5.	Errores en la dimensión de las secciones o en la disposición de las armaduras	251
2.1.6.	Errores en la elaboración de detalles	251
2.2.	DEFECTOS EN LOS COMPONENTES DEL HORMIGÓN ARMADO	251
2.2.1.	El cemento	251
2.2.2.	Los áridos	252
2.2.3.	El agua	253
2.2.4.	Los aditivos	253
2.2.5.	El acero	254
2.3.	DEFECTOS DE FABRICACIÓN	255
2.4.	DEFECTOS DE PUESTA EN OBRA	255

2.5.	CAMBIO DE LAS CONDICIONES DE USO	257
2.6.	DURABILIDAD DE LOS MATERIALES	257
3.	TIPOS DE DAÑOS	258
3.1.	DAÑOS POR CAUSAS MECÁNICAS	258
3.1.1.	Abrasión	258
3.1.2.	Erosión	258
3.1.3.	Solicitaciones	259
3.1.4.	Daños por incendio	262
3.1.5.	Daños accidentales	263
3.1.6.	Falta de adherencia entre hormigón y acero	264
3.2.	DAÑOS POR AGENTES FÍSICOS	265
3.2.1.	Heladicidad	265
3.2.2.	Presión de las sales de deshielo	265
3.2.3.	Ataque del hormigón por aguas puras	265
3.3.	DAÑOS POR AGENTES QUÍMICOS	265
3.3.1.	Oxidación y corrosión de las armaduras	265
3.3.2.	Ataque de terrenos agresivos	268
3.3.3.	Ataque de aguas agresivas	268
3.3.4.	Otros agentes	268
3.3.5.	Problemas del cemento aluminoso	268
4.	TÉCNICAS DE INSPECCIÓN	269
4.1.	EXAMEN DE LA DOCUMENTACIÓN EXISTENTE	269
4.2.	INSPECCIÓN VISUAL	270
4.3.	INSPECCIONES TÉCNICAS	270
4.3.1.	Conceptos	270
4.3.2.	Ensayos no destructivos	271
4.3.3.	Ensayos destructivos	274
5.	ANÁLISIS DE LOS DAÑOS	275
5.1.	GRIETAS Y FISURAS EN LOS ELEMENTOS ESTRUCTURALES	275
5.1.1.	Afogado	276
5.1.2.	Fisuras por retracción hidráulica	276
5.1.3.	Fisuras por asentamiento plástico	276
5.1.4.	Fisuras por exceso de sollicitación	276
5.2.	PANDEOS	277
5.3.	FLECHAS	278
5.4.	CORROSIÓN	278
5.5.	DAÑOS SUPERFICIALES	278
6.	TÉCNICAS DE REPARACIÓN	279
6.1.	REPARACIÓN DE GRIETAS Y FISURAS	279
6.1.1.	Cicatrización	279
6.1.2.	Ocratización	279
6.1.3.	Grapado	281

6.1.4.	Inyección de resina epoxi	281
6.1.5.	Inyección con pastas de cemento y microhormigones	281
6.1.6.	Sistemas postesados	282
6.1.7.	Sellado de grietas o fisuras	282
6.2.	REFUERZOS CON HORMIGÓN ARMADO	283
6.2.1.	Refuerzo de pilares	283
6.2.2.	Refuerzo de vigas	285
6.2.3.	Refuerzo de forjados	287
6.3.	REFUERZOS METÁLICOS	287
6.3.1.	Refuerzo de soportes	287
6.3.2.	Refuerzo de vigas	289
6.4.	REFUERZOS POSTESADOS	289
6.5.	REPARACIÓN DE OXIDACIÓN Y CORROSIÓN	294
	DE ARMADURAS	294
	BIBLIOGRAFÍA	299

Capítulo 1

CONCEPTOS GENERALES

1. INTRODUCCION

Partiendo del concepto de **patología constructiva** como «ciencia que estudia los problemas constructivos que aparecen en el edificio (o en alguna de sus unidades) después de su ejecución», tal como lo dejábamos definido en el libro *Patología de cerramientos y acabados arquitectónicos*, si queremos ahora referirnos al estudio de la patología de las estructuras que presenta el edificio, deberemos identificar en primer lugar los elementos que constituyen los sistemas estructurales de los mismos, así como los procesos patológicos que pueden sufrir.

Para ello resulta fundamental partir de la función que esos sistemas cumplen en el edificio, lo que nos conducirá a la descripción de los posibles procesos patológicos y, en consecuencia, las distintas técnicas de intervención que podemos aplicar.

Es evidente que la función principal de los elementos estructurales es la de soporte del edificio del que forman parte ante las acciones exteriores que atentan contra la estabilidad (la “Firmitas” de Vitrubio)

Estas acciones son, básicamente, las cargas que recibe o produce el edificio, cargas que podrán ser verticales u horizontales, permanentes o temporales, estáticas o dinámicas y que, con carácter general, podemos agrupar en exteriores, como viento, nieve y terremotos, e interiores, como el peso propio de la construcción (concargas) y el generado por su uso (sobrecargas) además de las cargas térmicas consecuencia de las dilataciones y contracciones de cualquiera de los elementos constructivos, desde los más externos (fachadas y cubiertas) hasta los de la propia estructura.

Como consecuencia, los procesos patológicos más inmediatos serán los que parten de esas acciones mecánicas como las causas directas que inician el proceso de deterioro. Serán, pues, procesos mecánicos, tal como quedaron también definidos en el capítulo 1 del mencionado libro, y sus lesiones consiguientes estarán, asimismo, dentro de las que denominábamos “lesiones mecánicas”, aunque ahora sean específicas de los procesos que afectan a los elementos estructurales.

No obstante, además de esos procesos patológicos de tipo mecánico, aparecen otros de tipo físico o químico, sobre todo cuando los elementos estructurales están al exterior y, por tanto, sometidos a los agentes atmosféricos y a la contaminación ambiental. El agua, el viento, los cambios de temperatura y los contaminantes químicos contenidos en la atmósfera, provocarán fácilmente la aparición de procesos patológicos de tipo físico y químico que producirán los consiguientes deterioros en los elementos estructurales afectados, deterioros que, si bien actuarán principalmente sobre la piel de esos elementos, sin embargo en algunos casos podrán

llegar a afectar a su capacidad resistente, como es el caso de la corrosión en perfiles metálicos o la de las armaduras del hormigón.

Las lesiones físicas y químicas superficiales han quedado vistas en el libro de cerramientos y acabados. Aquí haremos hincapié en aquellos procesos que afectan a la capacidad resistente.

Esos estudios nos permitirán, por una parte, analizar las medidas adecuadas de reparación para recuperar la funcionalidad estructural de los elementos afectados, proponiendo las técnicas de intervención más adecuadas para cada caso. Por otra, conocer las causas más corrientes, tanto directas como indirectas¹, que aparecen en los orígenes de esos procesos, lo que nos permitirá, a su vez, proponer las medidas de prevención necesarias en los proyectos para que no surjan dichos procesos.

En cualquier caso, para las actuaciones de reparación resultará imprescindible proceder previamente a un correcto diagnóstico de los procesos patológicos que afectan al edificio o a los elementos constructivos a reparar. En el mencionado libro de "Patología de cerramientos y acabados arquitectónicos" ya quedó analizado el proceso de diagnóstico y su alcance en la construcción. Recordemos simplemente que un diagnóstico completo debe indicarnos, tanto las lesiones aparentes, identificando correctamente cada una de ellas cuando aparecen varias simultáneamente, como los procesos patológicos ocurridos, con objeto de indicar con la máxima precisión las causas (sobre todo indirectas) que han facilitado la aparición de los procesos. La identificación de esas causas resulta primordial antes de proponer ningún tipo de actuación, de lo contrario correremos el riesgo de equivocarnos en el tratamiento, lo que podría originar, incluso, nuevos procesos patológicos. Resultan desgraciadamente frecuentes los casos en que se rigidizan estructuras que debían permanecer flexibles rompiendo por otro lado, o sellados de hormigón con armaduras corroídas sin limpiar éstas lo suficiente, por mencionar sólo algunos de los errores comunes.

Para evitar esos posibles errores debemos llevar a cabo una toma de datos completa de materiales y elementos lesionados, así como un análisis del proceso patológico lo más minucioso posible, con la ayuda de la instrumentación adecuada y de los ensayos mecánicos físicos y químicos de las muestras. Para ello deberemos tomarnos el tiempo necesario (siempre que sea posible) para analizar el proceso en sus diversas fases, caso corriente en los procesos patológicos mecánicos que nos ocupan, con deformaciones y roturas que pueden ser cíclicas. Hablaremos sobre ello en los diversos capítulos.

(1) Causas directas, como las acciones físicas, mecánicas o químicas, que inician un proceso patológico. Causas indirectas, como aquellos errores de proyecto o construcción que debilitan los materiales y elementos constructivos y facilitan la acción de las causas directas.

Como paso previo y con objeto de establecer claramente el “punto de partida”, consideramos conveniente recordar brevemente, por un lado, los distintos elementos estructurales de un edificio susceptibles de sufrir deterioro y, por otro, los diversos procesos patológicos que pueden provocar ese deterioro.

2. TIPOS ESTRUCTURALES

Veamos los elementos y sus materiales habituales:

2.1. CIMENTACIONES Y CONTENCIONES

Elementos de contacto y transmisión directa de cargas al suelo, aprovechando la capacidad portante de éste. Transmiten cargas horizontales y verticales, tanto por compresión como por rozamiento, como por “contrapeso” en caso de cargas negativas. Distinguimos los siguientes:

2.1.1. Muros de contención, cuya misión fundamental es la de contener el empuje de las tierras que sujetan, aunque en muchas ocasiones son, además, la cimentación de una parte del edificio, por lo que reciben también cargas verticales.

A) *Exteriores*. Sólo actúan conteniendo empujes horizontales (tierra o agua) y pueden ser de diferentes materiales.

- Obra de fábrica, de piedra, ladrillo, o bloque.
- Entibaciones, de madera o metal.
- Hormigón, en masa o armado.

B) *Interiores*. Contienen empujes horizontales y soportan cargas verticales, más o menos centradas. Pueden ser, también, de diversos materiales, sobre todo según su época.

- Obras de fábrica, de piedra o ladrillo, normalmente en edificaciones antiguas y profundidades limitadas.
- Hormigón armado, de diversos tipos de ejecución, constituyendo muros pantalla.
- Líneas de pilotes y micropilotes, cuando se ejecutan previos a la excavación. Los hay de diversos tipos según sistema y casa comercial.

2.1.2. Cimentación superficial, que tiende a repartir la carga vertical que soporta en una superficie de terreno suficiente. No recibe, en principio, empujes horizontales, aunque sí flexiones, según su sistema de cálculo y ejecución. Consideramos tres tipos básicos:

A) *Zapatas aisladas*, a veces atadas entre sí por vigas riostras para su mejor funcionamiento constructivo. Suelen ser de:

- Hormigón en masa o armado, estas últimas de menor profundidad y trabajando a flexión.

B) *Zapatas corridas*, en la base de muros de carga. Pueden ser de:

- Obra de fábrica, de piedra suelta comprimida o unida con argamasa y ladrillo recibido con mortero de cal, ambos casos en obras anteriores a 1900 ó de principios del siglo XX.
- Hormigón en masa o armado, normalmente este último

C) *Losas*, continuas y de pequeño espesor. Siempre de:

- Hormigón armado, trabajando a flexión.
- Hormigón en masa, cuando se trata de bases para pavimentos.

2.1.3. Cimentación profunda, para buscar capas más resistentes o trabajar por rozamiento de sus paredes. Trabajan, básicamente, a compresión. Distinguimos:

A) *Pozos*, normalmente uno por pilar, unidos con vigas riostras o repartidos periódicamente bajo un muro de carga y arriostrados con arcos de descarga. Pueden ser de:

- Hormigón en masa o armado, en los casos de vigas riostras.
- Fábrica de ladrillo y mortero de cal, circulares o cuadrados, con arco de descarga de la misma fábrica.

B) *Pilotes y micropilotes* para cargas verticales por reacción o rozamiento. Suelen ser de:

- Hormigón armado.
- Vaina metálica.

Esta relación se puede resumir en el siguiente cuadro:

TIPOLOGIA DE ESTRUCTURAS DE CIMENTACION EN LOS EDIFICIOS (*)

Tipo	Elementos	Materiales
Contención	Muros exteriores	Obras de fábrica Entibación de madera o metal Hormigón en masa o armado
	Muros interiores y muros pantalla	Obras de fábrica Hormigón armado Pilotes y micropilotes
Cimentación superficial	Zapatas aisladas	Hormigón en masa o armado
	Zapatas corridas	Obra de fábrica Hormigón en masa o armado
	Losas	Hormigón armado Hormigón en masa para pavimentos
Cimentación profunda	Pozos	Fábrica de ladrillo Hormigón en masa o armado
	Pilotes y micropilotes	Hormigón armado Vaina metálica

En estos elementos los procesos patológicos aparecerán, básicamente, por tres causas principales, a saber:

- *Exceso de cargas* a transmitir, tanto de compresión como de tracción.
- *Fallo del terreno*, por ser más compresible de lo que se pensaba o por haber sufrido variaciones en su estructura (lavados, corrimientos, etc)
- *Fallo del elemento estructural*, por error de cálculo, de ejecución o de alteración de sus características físico-químicas (corrosión de armaduras, decementaciones, etc)

2.2. OBRAS DE FÁBRICA

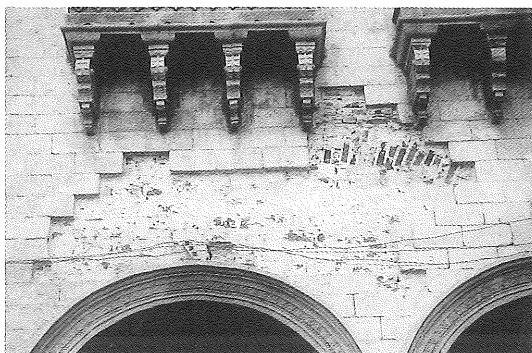
Con este tipo de materiales encontramos sobre todo estructuras verticales y horizontales en bóveda. Veamos:

2.2.1. Muros y pilastras que reciben cargas verticales más o menos centradas y ligeros empujes horizontales, y pueden actuar como elementos de arriostramiento. Los encontramos de sillería, mampostería, tapial, adobe, ladrillo, bloque de mortero, etc.

(*) Obtenido del Manual de Mantenimiento de Edificios editado por el Consejo Superior de los Colegios de Arquitectos de España, con participación de los autores.



1.1. Pilares y arcos ligeros de piedra.



1.2. Muro resistente de ladrillo chapado de piedra.

También cabe considerar aquí los muros de entramado a base de pies derechos y carreras de madera, con tornapuntas arriostrantes y cuajados de algún tipo de fábrica, normalmente adobe o ladrillo.

En general constituyen elementos rígidos que trabajan a compresión y necesitan, por tanto, continuidad y solidez de apoyo.

2.2.2. Columnas y arcos, como muros de carga aligerados con disposición estudiada de piezas individuales para recibir compresiones. Permite además abrir huecos en los muros de carga y exigen precisión en sus piezas y solidez de apoyos al generar en ellos cargas horizontales. Suelen ser de sillería, ladrillo y sus combinaciones. También algunos adobes.

2.2.3. Bóvedas, a base de piezas sometidas básicamente a compresión al igual que los arcos (podrían considerarse como una sucesión de éstos) por lo que tienen sus mismas exigencias de ejecución. Los materiales más utilizados son también la piedra de sillería, el ladrillo y las combinaciones de ambos. En algunas ocasiones podemos encontrar bóvedas de adobe e, incluso, de tapia.

2.3. ESTRUCTURAS DE MADERA

Como material más antiguo sometido a los tres esfuerzos básicos (compresión, tracción y flexión) ha permitido su uso en estructuras reticuladas a base de ele-



1.3. Muros entramados en 1ª y 2ª plantas.

mentos lineales (su forma original). Las encontramos, por tanto, en los siguientes tipos:

2.3.1. Pilares y vigas, como elementos lineales que reciben la carga de forjados y la transmiten, sufriendo esfuerzos de compresión y pandeo los pilares, flexión y esfuerzo cortante las vigas, además de compresión y tracción los elementos inclinados de arriostramiento. La madera tradicional es la escuadría maciza y en la actualidad encontramos también madera compuesta o laminada. Podemos incluir aquí el entramado de los muros comentados en el punto 2.2.1.

En estos casos adquiere importancia la solución de las uniones y las escuadrías.

2.3.2. Forjados unidireccionales, a base de viguetas de madera y bovedillas, o rellenos de yesones o rasillas cerámicas. Se trata también de escuadrías macizas (las antiguas) o laminadas (más modernas) y se ven afectadas, sobre todo, por la flexión (grandes flechas) y el esfuerzo cortante en sus apoyos, con peligro de colapso, al verse atacados éstos por hongos y xilófagos.

2.3.3. Cerchas y formas trianguladas de cubierta, en general, a base de elementos de distintas longitudes sometidos a compresión o tracción, con posibles combinaciones con barras metálicas para absorber las tracciones y piezas también metálicas para resolver los nudos, puntos de vital importancia para el correcto funcionamiento de las formas.

Como problema patológico común a los elementos leñosos, hay que recordar los ataques de organismos, tanto insectos xilófagos como las pudriciones producidas por hongos.

2.4. ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN

Material compuesto (hormigón y acero) de carácter formáceo y capaz de aguantar casi cualquier tipo de esfuerzo (compresión, cortante, flexión, torsión, etc) según su diseño. Esto, unido a su moldeabilidad, hace que sea un material muy versátil y de uso prácticamente universal. No obstante, el ser un material pétreo artificial, lo hace susceptible también de procesos patológicos físicos y químicos que pueden afectar a su durabilidad. Cubre, prácticamente, todos los tipos estructurales.

2.4.1. Estructuras verticales

- A) *Muros de carga*, que pueden ser, además, cerramientos de fachada o divisiones interiores. Pueden recibir tanto cargas verticales, más o menos centradas, como horizontales de arriostramiento.
- B) *Pilares y vigas*, quizás el tipo estructural de h.a. más extendido, como sistemas verticales que soportan los forjados y transmiten su carga a los cimientos, con la posibilidad de obtener estructuras hiperestáticas gracias a su construcción “in situ”, resolviendo además las cargas horizontales y el arriostramiento. También cabe considerar aquí los grandes elementos prefabricados que compiten con éxito con las estructuras metálicas.

2.4.2. Estructuras horizontales

- A) *Forjados y losas*, para resolver superficies planas trabajando a flexión.
Forjados, a base de **viguetas y bovedillas** además de la capa de compresión. Esta y las viguetas resueltas normalmente con h.a.
Losas, bidireccionales, macizas, aligeradas, de casetones o prefabricadas, todas ellas resueltas con h.a. como material prácticamente exclusivo.
- B) *Bóvedas y cáscaras* para resolver grandes luces con poco espesor.
Las **bóvedas**, con directriz más peraltada y material trabajando preferentemente a compresión.
Las **cáscaras**, más tendidas y de menor espesor, y trabajando también a flexión. Estas últimas, con posibles problemas de durabilidad dado su reducido espesor y la inevitable fisuración del hormigón que facilita las acciones fisicoquímicas de la atmósfera.

2.5. ESTRUCTURAS METÁLICAS

Material actual con dos características básicas; su gran **tenacidad**, que lo hace apto para cualquier esfuerzo (incluso y sobre todo, tracción) con una sección reducida, y la **ligereza** consiguiente de las estructuras, que hace que sea un material casi exclusivo para grandes alturas y grandes luces.

Por sus características, su uso se limita a estructuras a base de elementos lineales, como la solución moderna de las antiguas estructuras de madera.

2.5.1. Forjados, en los que el acero se emplea para resolver las viguetas o la chapa a tracción en las modernas losas ligeras con chapa plegada.

2.5.2. Pilares y vigas, de uso más universal, incluso para edificaciones pequeñas, debido a la rapidez y limpieza de su montaje. Permite, además, todo tipo de nudos con gran facilidad, tanto articulados como apoyados como empotrados, con diversidad de uniones (soldadas, atornilladas, etc). No obstante, necesita el control minucioso de la ejecución de esas uniones, así como la protección ante dos acciones muy específicas: la corrosión y el fuego. Por otra parte, la ligereza de sus soluciones obliga a controlar su movilidad, tanto elástica (flechas y pandeos) como térmica (dilataciones y contracciones) que pueden afectar a los cerramientos de fábrica en ella apoyados, originando numerosas roturas, tanto grietas como fisuras.

2.5.3. Formas de cubierta, soluciones muy ligeras para grandes luces a base de barras relativamente cortas unidas entre sí y trabajando a compresión o tracción.

- A) *Cerchas*, como formas planas, de elementos triangulados (pilares, vigas, arcos, etc).
- B) *Mallas espaciales* trabajando como láminas (a tracción) o cáscaras (a compresión) o losas a flexión.

En todas ellas resulta fundamental la correcta ejecución de los nudos (muchos de ellos con patente) y la facilidad de movimientos, tanto elásticos como térmicos, debido a sus grandes dimensiones.

Podemos resumir todas estas estructuras sobre rasante en el siguiente cuadro:

TIPOLOGÍA DE ESTRUCTURAS EXTERIORES EN LOS EDIFICIOS^(*)

Tipo	Elementos	Materiales
Estructura vertical	Muros de carga	Obra de fábrica Entramado Hormigón armado
	Columnas y arcos	Obras de fábrica
	Pilares y vigas	Obras de fábrica mixtas Hormigón armado Madera Perfil metálico
Estructura horizontal	Bóvedas	Obras de fábrica Hormigón en masa o armado
	Forjados y losas	Madera
	F. unidireccionales	Perfil metálico
	Viguetas	Hormigón armado o pretensado
	Bovedillas	Cerámica Mortero Plástico
	Losas	Hormigón armado
	Macizas	
	Bidireccionales	
	Reticulares o de casetones	
	Prefabricadas (alveoladas)	
	Láminas	Hormigón armado
	Cáscaras	Entablado de madera
	Membranas	Mallas de cables Tela
	Trianguladas	Madera
	Cerchas	Hormigón armado
	Perfiles metálicos	Perfiles metálicos
	Mallas espaciales	Madera Perfiles metálicos

(*) Obtenido del Manual de Mantenimiento de Edificios editado por el Consejo Superior de los Colegios de Arquitectos de España, con participación de los autores.

3. PROCESOS PATOLOGICOS POSIBLES

Podemos identificar tres familias de procesos patológicos que afectan a los elementos constructivos en función de su “carácter”, es decir, del tipo de acción que lo provoca y de la propia evolución del proceso. Así, podemos hablar de procesos mecánicos, físicos y químicos.

En lo que respecta a los elementos estructurales del edificio, podemos encontrar procesos de los tres tipos aunque, por su funcionalidad, cobran más importancia los mecánicos. Para tener una visión de conjunto, hagamos un breve repaso de dichos procesos, indicando elementos y materiales susceptibles de sufrirlos.

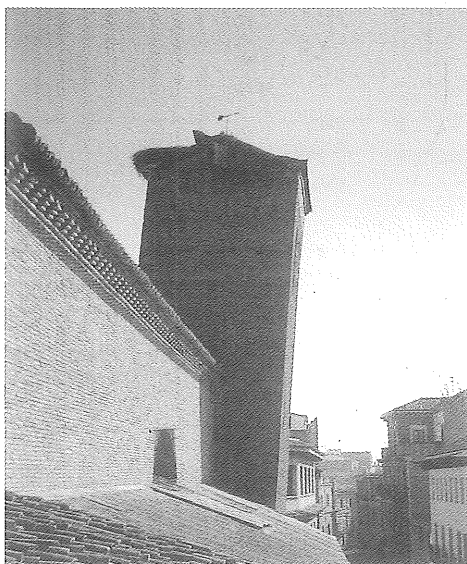
3.1. PROCESOS MECÁNICOS

Surgen como consecuencia de la función soporte de los elementos estructurales y suelen afectar a la integridad del conjunto. Distinguimos dos conjuntos de lesiones:

3.1.1. Deformaciones

Suelen deberse a dos tipos de causa, una indirecta (de proyecto o ejecución) y otra directa (de uso) que pueden actuar independiente o simultáneamente:

- *Causa indirecta*: insuficiente capacidad, bien por error de cálculo o por mala ejecución (disposición de armaduras, falta de vibrado, poca resistencia característica de hormigón, fallo de soldadura, etc)



1.4. Desplome de torre de ladrillo por asientos.

- *Causa directa*: exceso de carga o sobrecarga, bien por aumento de la edificación, bien por modificación de uso, bien por variaciones dimensionales debidas a cambios de temperatura o humedad.

En cualquier caso, la deformación puede sobrevenir en el propio elemento defectuosos o en otro ligado estructuralmente a aquel (caso de unos pilares desplomados por asiento de la cimentación). Podemos distinguir, básicamente, los siguientes tipos:

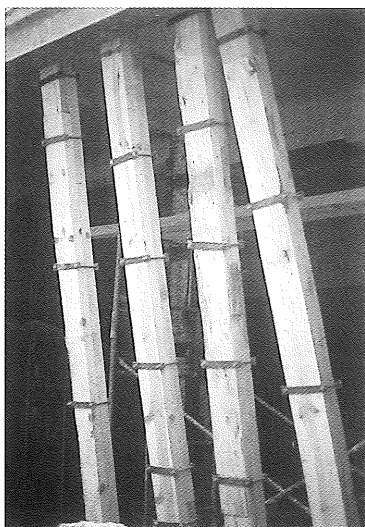
- **Asientos de cimentaciones**, por fallos del terreno, dimensionado insuficiente o aumento de carga. Producen efectos patológicos (deformaciones, grietas, etc) en las estructuras aéreas.
- **Desplomes de muros y pilares**, por asientos previos, falta de dimensionado o aumento de carga (empujes).
- **Alabeos de muros**, pilares y vigas, por las mismas causas anteriores.
- **Pandeos de muros y pilares**, por falta de dimensionado o aumento de carga.
- **Hundimientos de arcos**, bóvedas y cáscaras, por asientos, desplomes, falta de dimensión o aumento de carga.
- **Flechas de vigas, forjados, y losas** por falta de dimensión o aumento de carga.



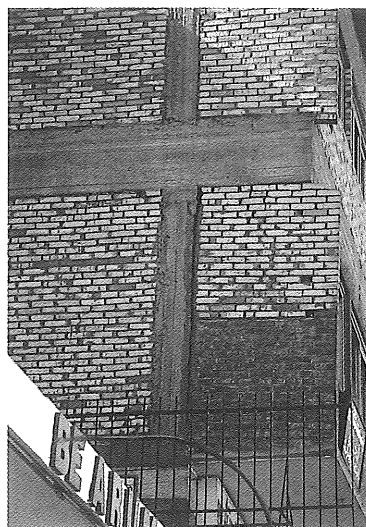
1.5. Deformación de dintel adovelado por asiento de machón de sillares.



1.6. Deformación de coronación de muro de adobes por empuje de estructura de cubierta.



1.7. Apeo provisional para refuerzo de viga.



1.8. Desplazamiento de cerramiento de ladrillo por flecha de voladizo de hormigón.

3.1.2. Roturas

Aparecen principalmente en elementos superficiales (verticales u horizontales) y en lineales de hormigón armado. Se deben a los mismos tipos de causas mencionadas en el punto anterior (indirectas y directas) aunque en estas últimas cobran una importancia especial las debidas a variaciones higrotérmicas.

También aquí hay que considerar como posibles causas directas todas las deformaciones enumeradas en el punto anterior, ya que las mismas suelen ocasionar esfuerzos de compresión, tracción y cortantes que preceden a la rotura en los elementos adyacentes. En el caso del hormigón armado, puede ser causa de fisuras la corrosión de las armaduras como veremos en su momento. Debemos distinguir entre dos grandes tipos:

GRIETAS, cuando afectan a todo el espesor del elemento, sobre todo en los casos de obras de fábrica. En el hormigón armado, debido a su heterogeneidad como consecuencia de la inclusión de armaduras, puede darse el caso de que no lleguen a atravesar el elemento. En cualquier caso, no dependen de su abertura, aunque ésta es, en ocasiones, importante para conocer la evolución del proceso.

Son, normalmente, perpendiculares al esfuerzo que las provoca, si es de tracción, o paralelas, si es cortante y, sin ánimo de ser exhaustivos, podemos enumerar los siguientes subtipos, según la causa. (Fig. 1.1)

A) Por asientos

En muros de fábrica y de hormigón en masa:

- Vertical, por asiento puntual, tanto en V positiva en la parte superior, como en V invertida en el centro de la parte inferior
- Inclínada y repetida, por asiento puntual
- En arco de descarga, por asiento continuo

En muros de hormigón armado:

- Vertical, por asiento puntual.
- Inclínada, por asiento continuo.

En vigas de hormigón armado:

- Verticales, en sus bordes empotrados, por esfuerzo cortante.
- Inclínadas a 45° en la misma situación anterior.

En bóvedas:

- Lineales según su directriz, por asiento continuo.
- Perpendiculares a la directriz, por asiento puntual.

B) Por empujes de tierras o de unos elementos sobre otros

En muros de cualquier tipo:

- Verticales, en encuentro con otros muros o por empuje de tierras.
- Horizontales, en encuentro con forjados, en arranques de bóvedas o por empuje de tierras.

(En los de hormigón armado, puede haber variaciones de linealidad según la disposición de armaduras)

En pilares y vigas de hormigón armado:

- Inclínadas, en empotramiento de vigas por flechas excesivas.
- Horizontales, en cabeza de pilar por pandeo.

En bóvedas:

- Lineales según su directriz, por desplomes.

C) Por movimientos térmicos

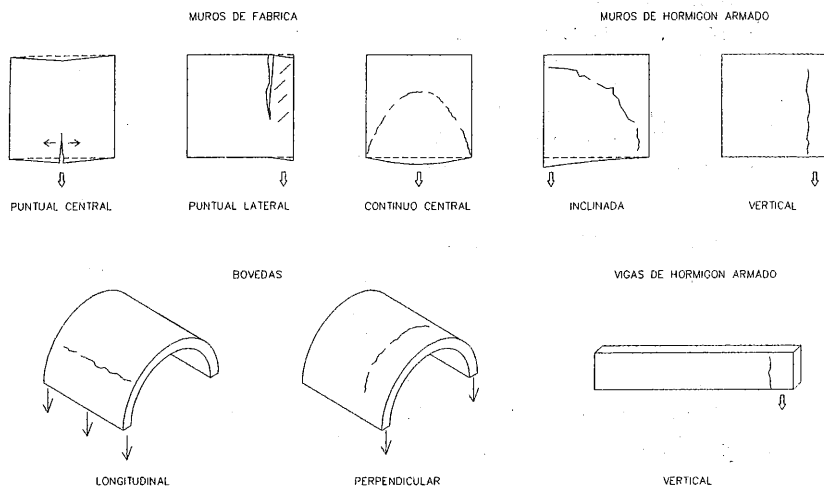
En muros de cualquier tipo:

- Verticales en el punto intermedio, con posible localización en esquinas de huecos de puerta o ventana, o en encuentro con otros elementos estructurales (esquinas)

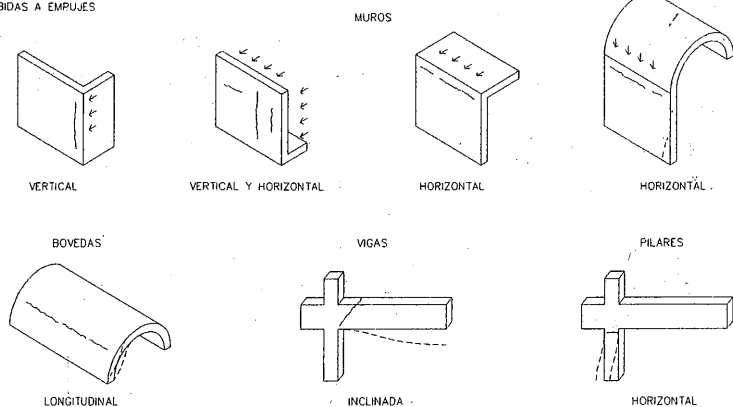
En vigas y pilares de hormigón armado:

- Verticales en vigas, próximo a su centro.
- Horizontales en cabeza de pilares por esfuerzo cortante.

A) DEBIDAS A ASIENTOS



B) DEBIDAS A EMPUJES



C) DEBIDAS A VARIACIONES TERMICAS

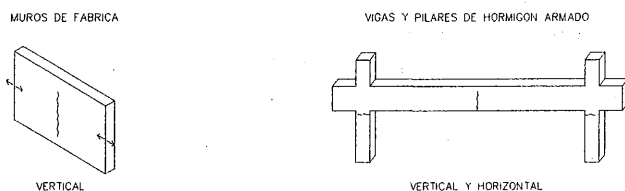
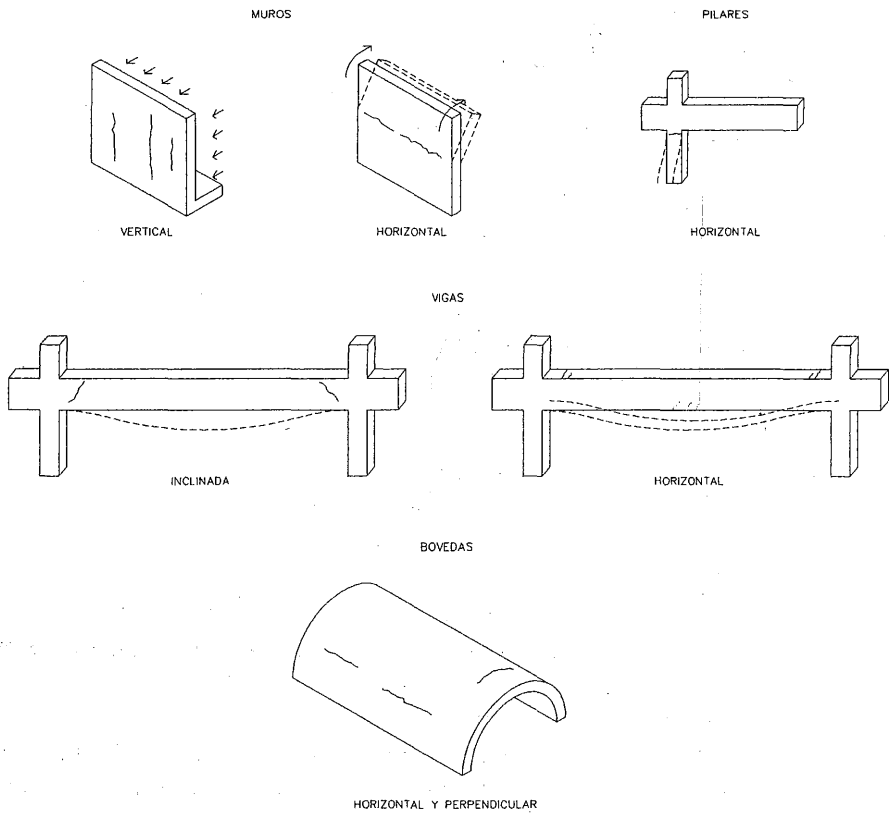
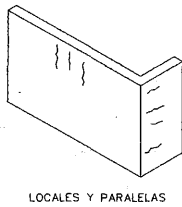


Fig. 1.1. Tipología de grietas en elementos estructurales.

A) DEBIDAS A ACCIONES MECANICAS



B) DEBIDAS A MOVIMIENTOS HIGROTÉRMICOS



C) DEBIDAS A LA CORROSION DE ARMADURAS

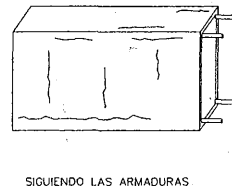


Fig. 1.2. Tipología de grietas en elementos estructurales.

FISURAS, cuando afectan a la parte exterior del elemento constructivo y, concretamente, al recubrimiento de hormigón en el armado. Según la causa que las provoca, podemos distinguir: (ver fig. 1.2)

A) Por acciones mecánicas

En muros de cualquier tipo:

- Verticales, por empuje que no llega a romper.
- Horizontales, por rotación o por pandeo.

En pilares:

- Horizontales, en la zona central, por pandeo.

En vigas:

- Inclinadas en los extremos, por flecha.
- Horizontales en el centro de su cara inferior, o en los extremos de su cara superior, por flechas.

En bóvedas de hormigón armado:

- Lineales según su directriz por empuje lateral.

B) Por movimientos higrotérmicos

En elementos de hormigón armado a la intemperie:

- Fisuras locales y paralelas en continuidad en las zonas más expuestas.

C) Por corrosión de armaduras

En elementos de hormigón armado, sobre todo los expuestos a la intemperie:

- Fisuras locales siguiendo armaduras, sobre todo estribos, y las superficiales en general.

3.2. PROCESOS FÍSICOS

Debidos a la acción de los agentes meteorológicos sobre la superficie de los elementos estructurales situados al exterior. Afecta, por tanto, a los elementos de obra de fábrica y de hormigón por su carácter poroso. Aunque estos procesos ya han quedado estudiados en el libro de “patología de cerramientos y acabados arquitectónicos”, conviene recordar que la lesión más importante es la erosión física, conocida vulgarmente como meteorización, por deberse a la acción combinada de los “meteoros” atmosféricos sobre los materiales porosos, es decir, penetración de agua combinada con cambios de temperatura y, sobre todo, helada que rompe superficialmente. Es más intensa cuanto mayor es el índice de absorción superficial del material y cuanto más bruscos son los cambios de temperatura (orientación Oeste).

3.3. PROCESOS QUÍMICOS

Suelen ser consecuencia de la presencia de contaminantes químicos en la atmósfera que se unen a los agentes meteorológicos para complementar su acción con el ataque químico a los materiales pétreos.

Cabe considerar, también, la acción de los diversos organismos xilófagos que atacan las estructuras de madera.

Aunque todos estos procesos han sido también estudiados en el trabajo sobre cerramientos y acabados, parece interesante, cuanto menos, recoger un esquema de los mismos, al margen de lo que se describa en los siguientes capítulos.

3.3.1. Corrosión

Aparece, naturalmente, en estructuras metálicas y en las de hormigón armado.

A) Estructuras metálicas

La causa principal es el contacto con la humedad, aunque pueden aparecer también pares galvánicos localizados.

La humedad actúa, básicamente, de tres formas:

- **Corrosión por oxidación previa**, cuando el óxido húmedo pasa a hidróxido y actúa de cátodo sobre el resto del metal. Aparece siempre que le falta protección al elemento y éste es alcanzado por humedad, bien sea directa (interperie) bien sea de condensación superficial, incluso en elementos ocultos dentro de obras de fábrica (el mortero de cemento no es protección suficiente).
- **Corrosión por aireación diferencial**, cuando falta la protección antioxidante y se da cierta permanencia de zonas húmedas junto a zonas secas (arranque de pilares, elementos planos exteriores e interiores, uniones longitudinales en horizontal entre perfiles, etc) lo que provoca una diferencia de potencial entre ellas.
- **Corrosión por inmersión**, debido a la permanencia de parte del elemento metálico en ambiente saturado (terreno húmedo, por ejemplo) y ausencia de protección antioxidante, lo que puede llegar a formar hidróxido y disolverlo, según el pH del agua.
- **Corrosión por par galvánico**, que suele ser puntual y debida al contacto con materiales de mayor potencial electroquímico. También se facilita por la ausencia de protección antioxidante y la presencia de agua o algún otro electrolito.

Como podemos comprobar, la mayor parte de dichas corrosiones se pueden evitar con una protección antioxidante mantenida, incluso en elementos teóricamente

protegidos por mortero de cemento de hormigón.

B) Armadura de hormigón

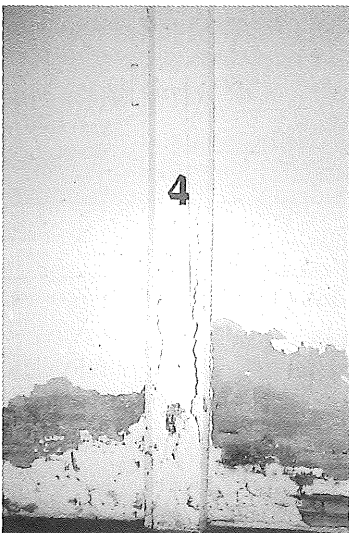
Podemos distinguir dos causas que provocan esta corrosión:

- Por un lado, la posible filtración de agua desde el exterior a través de fisuras, que afecta, sobre todo, a las armaduras más superficiales (estribos) pero que puede alcanzar a todas ellas, con más intensidad cuanto más húmedo y más agresivo es el ambiente.
- Por otro, la posible acción química de cloruros u otros agentes provenientes del hormigón que rodea a las armaduras, en función del tipo de cemento y, sobre todo, de los áridos, así como la propia carbonatación del hormigón que deja de proteger a las armaduras al perder alcalinidad.

3.3.2. Erosión química

Producida por la actuación de los contaminantes contenidos en la atmósfera combinados con los fenómenos meteorológicos, sobre todo la lluvia que ayuda a su acción. Podemos distinguir diversos efectos según el material, el contaminante, y la situación climatológica (pátinas, alveolos, decementación, costras, eflorescencias). Afecta, sobre todo, a las fábricas de piedra (sillería y mampostería) y algo a las de ladrillo, principalmente mediante eflorescencias.

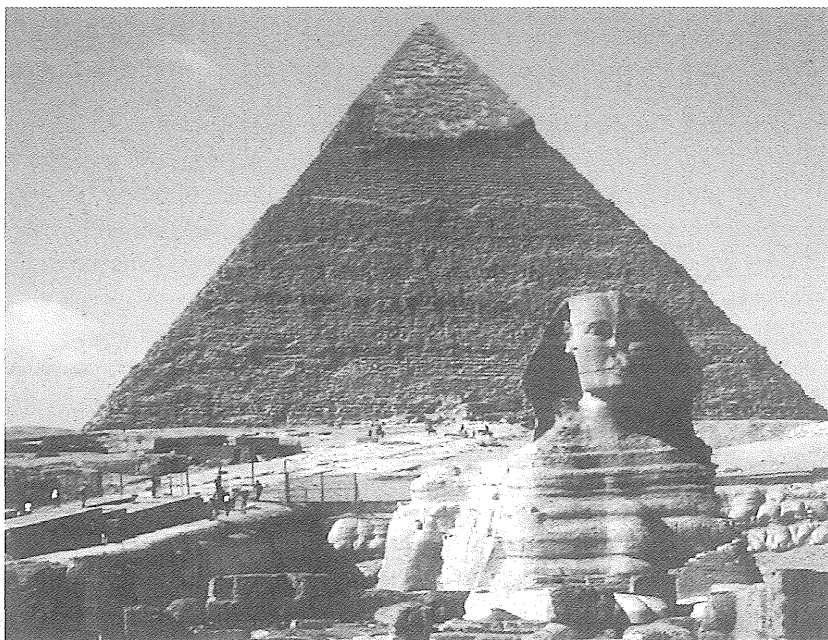
En el caso del hormigón, influye el tipo de árido y puede provocar además ataques corrosivos a las armaduras.



1.9. Oxidación de armaduras por humedad capilar, con desprendimiento de capa de recubrimientos.



1.10. Alteración de forjado birreticular por fuego.



1.11. Erosión superficial en piedra.

3.3.3. Erosión biológica

Aparece, básicamente, en los elementos estructurales de madera como consecuencia de la acción de insectos xilófagos y de hongos que la pudren, provocando en conjunto una pérdida de material, más o menos importante, así como una debilitación de sus fibras resistentes que puede llevar al colapso.

A) Insectos xilófagos que se alimentan de la madera y de los que distinguimos dos tipos de familias:

- **Coleópteros**, como carcomas y polillas, que depositan sus huevos en las fendas superficiales de la madera. Las larvas que nacen de ellos se alimentan de la fibra de la madera, cavando galerías longitudinales, hasta que se convierte en “imago” y salen al exterior perforando los conocidos orificios de diámetro variable, dependiendo del tamaño del insecto.
- **Isópteros**, sobre todo termitas de diversas clases, que radican sus colonias bajo tierra en zonas próximas a los edificios y que desde allí, pasando por debajo de las cimentaciones o, incluso, perforándolas, lle-



1.12. Desmoronamiento de muros entramados con plementerio de adobs.



1.13. Erosión de pilastra de piedra con pérdida de sección resistente.

gan hasta la madera de los edificios, alimentándose de ella y destruyéndola a base, también, de galerías longitudinales.

B) Hongos de pudrición, que suelen establecer sus colonias sobre los elementos de madera en unas condiciones determinadas de humedad y temperatura y que, al alimentarse de la misma, la destruyen. Podemos distinguir varios tipos según su coloración y sistema de destrucción.

- *Hongos azulados (cromógenos)* que actúan exclusivamente en la superficie sin atacar los tejidos leñosos, por lo que no afectan a la integridad del material.
- *Hongos de pudrición blanca*, con destrucción de la lignina y aparición de un aspecto blanquecino con alveolos y fisuras, incluso zonas de aspecto algodonoso (hongo doméstico).
- *Hongos de pudrición parda*, con ataque directo a la celulosa y aparición de un cuarteado característico (pudrición cúbica) de color pardo y tacto pulverulento.

Como resumen, podemos sintetizar todo lo anterior en el siguiente cuadro:

PROCESOS PATOLOGICOS EN LOS ELEMENTOS ESTRUCTURALES DE UN EDIFICIO(*)

LESIÓN	TIPO	CAUSA	ELEMENTO	EFFECTO
Deformación	Asiento	Fallo del terreno Dimensión insuficiente Aumento de carga	Cimentación Muro de carga Bóvedas	Desplomes Hundimientos Roturas
	Desplome	Asiento	Muros Pilares	Falta de verticalidad
	Alabeo	Asiento Dimensión insuficiente Aumento de carga	Muros Pilares Vigas	Falta de planidad
	Pandeo	Dimensión insuficiente Aumento de carga	Muros Pilares	Falta de planidad
	Hundimiento	Asiento Desplomes Dimensión insuficiente Aumento de carga	Arcos Bóvedas Cáscaras	Pérdida de directriz
	Flecha	Dimensión insuficiente Aumento de carga	Vigas Forjados Losas	Pérdida de directriz
Rotura	Grietas	Asiento previo	Muros de carga	Grieta vertical Grieta inclinada repetida Grieta en arco de descarga
			Vigas de h.a.	Grieta vertical
			Bóvedas	Grieta lineal según directriz Grieta perpendicular a la directriz
		Empuje de tierras o de otros elementos	Muro de carga	Grieta vertical en encuentro con forjados
			Pilares y vigas de h.a	Grieta inclinada en empotramiento vigas Grieta horizontal en cabeza de pilar
			Bóvedas	Grieta lineal según directriz
		Movimiento térmico	Muros de carga	Grieta vertical o en hueco
			Pilares y vigas de h.a	-Grieta vertical en vigas -Grieta horizontal en cabeza de pilar
	Fisura	Acciones mecánicas y deformaciones	Muros de carga o contención	F. Verticales por empuje que no rompe F. Horizontales por rotación o pandeo
			Pilares	F. Horizontales por pandeo
			Vigas	F. Inclinadas por flecha F. Horizontales en la base por flecha
		Movimientos higrótérmicos	Bóvedas de h.a.	F. Lineales según directriz
			Elementos de h.a. en general	F. Locales y repetidas
		Corrosión de armaduras	Elementos de h.a. en general	F. Locales siguiendo armaduras

(*) Obtenido del Manual de Mantenimiento de Edificios editado por el Consejo Superior de los Colegios de Arquitectos de España, con participación de los autores.

LESIÓN	TIPO	CAUSA	ELEMENTO	EFEECTO
Corrosión	Corrosión	-Oxidación previa	-Perfiles metálicos en general	-Pérdida de material en general
		-Inmersión	-Armaduras de hormigón	
		-Aireación diferencial	-Perfiles metálicos en general	-Pérdida local de material
		-Par galvánico -Ataque de cloruros -Carbonatación del hormigón	-Armaduras de hormigón	-Pérdida de metal y esponjamiento
Erosión	E. Física (meteorización)	-Absorción de agua y helada	Elementos de -Fábrica -Hormigón	-Desagregación -Pérdida de material superficial
	E. química	Absorción de agua y contaminantes	-Id.	-Pátinas -Alveolos -Decementación -Costras -Eflorescencias
	E. biológica	Insectos xilófagos	-Elementos de madera	-Galerías con pérdida de material
		Hongos cromógenos	-Id.	-Coloración azulada
		Hongos de pudrición	-Id.	-Pudrición con: -Pérdida de material
				-Aparición de colonias

4. DIAGNÓSTICO

Como quedó dicho, resulta una fase fundamental en el estudio patológico de la estructura dañada que pretende establecer las pautas de su reparación. Cualquier error en esta fase puede llevar a errores subsiguientes en la intervención y, por tanto, nuevos procesos patológicos. De ahí que resulte preciso llevar a cabo con suma cautela el estudio de los elementos dañados y asegurarnos que hemos cubierto todas las posibilidades de afección.

Aunque incidiremos sobre ello en cada uno de los capítulos siguientes, sirva como recordatorio general el siguiente cuadro donde se realiza una revisión de los distintos elementos y materiales estructurales y se indican los tipos de observación y toma de datos necesarios en cada caso.

OBSERVACIÓN Y TOMA DE DATOS PREVIAS (*)

ELEMENTO	MATERIAL	OBSERVACIÓN	TOMA DE DATOS
Terreno		Posibles asientos de estructura vertical con deformaciones, grietas, etc.	Estado geotécnico
Contenciones	Fábrica de piedra, ladrillo o bloque	Posibles deformaciones o roturas	Si deformaciones o grietas: comprobación de movilidad y capacidad resistente
		Erosión física y química	Si erosión física: profundidad Si erosión química: agente provocante
	Hormigón en masa o armado	Posibles deformaciones o roturas	Control de calidad mediante probetas testigo según EH-91. Si deformaciones o grietas: comprobación de movilidad y distancia entre juntas de retracción, así como capacidad resistente
		Erosión física y química	Si erosión física: profundidad Si erosión química: agente provocante Posible comprobación del estado tensional
Cimentaciones	Fábrica de piedra o ladrillo	Posibles asientos en estructura vertical y rotura de cimentación	Si rotura: comprobación de movilidad y capacidad resistente

(*) Obtenido del Manual de Mantenimiento de Edificios editado por el Consejo Superior de los Colegios de Arquitectos de España, con participación de los autores.

ELEMENTO	MATERIAL	OBSERVACIÓN	TOMA DE DATOS
Cimentaciones	Hormigón en masa o armado	Posibles asentos en estructura vertical y rotura de cimentación	Control de calidad mediante probetas testigo según EH Si grietas: comprobación de movilidad y cap. resistente
		Erosión química (aguas sulfurosas)	Si erosión química: comprobación de alcance
Muro de carga Pilastras Arcos y bóvedas	Fábrica de piedra o ladrillo o bloque	Posibles deformaciones o roturas	Resistencia a compresión de la fábrica según NBE-FL-90, RL-88
		Erosión física o química	Si deformaciones o roturas, comprobación de movilidad y distancia entre juntas de retracción. Si erosión física, profundidad. Si erosión química, agente provocante
	Hormigón armado	Posibles deformaciones o roturas	Control de calidad mediante testigos según EH-91 Control deposición de armaduras Si deformaciones o roturas, comprobación de movilidad
		Erosión física o química	Si erosión física, profundidad
		Corrosión de armaduras	Si erosión química, agente provocante
		Carbonatación del hormigón	Posible comprobación de estado tensional
Pilares y vigas	Hormigón armado	Posibles deformaciones o roturas	Control de calidad mediante testigos según EH-91 Control de posición de armaduras Si deformaciones o roturas, comprobación de movilidad
		Erosión física o química	Si erosión física, profundidad Si erosión química, agente provocante
		Corrosión de armaduras	Si corrosión de armaduras, control de velocidad de corrosión
		Carbonatación del hormigón	Posible comprobación de estado tensional
	Perfiles metálicos	Posibles deformaciones	Control de calidad del material y de las soldaduras, según NEB-MV-103,104 Si deformaciones, comprobación y movilidad
		Oxidación o corrosión superficial Protección contra el fuego	Si corrosión, alcance Protección al fuego de cada elemento según NBE-CPI
	Madera	Posibles deformaciones	Control de calidad de la madera según UNE 56.540
		Existencia de fendas	Si deformaciones, comprobación y movilidad
		Posible erosión biológica	Si erosión biológica, alcance

ELEMENTO	MATERIAL	OBSERVACIÓN	TOMA DE DATOS
		Integridad de apoyos y nudos	Protección al fuego de cada elemento según NBE-CPI
		Protección contra el fuego	
Forjados y losas	Viguetas y bovedillas	Posibles deformaciones (flechas) y grietas	Ficha técnica del forjado Control de calidad según EF-88. Control de movilidad en deformaciones y grietas
		Erosión biológica de viguetas de madera	Si erosión biológica, alcance
		Corrosión de viguetas metálicas o armaduras	Control de velocidad de corrosión en armaduras Control de cemento aluminoso
	Losas de h.a. , macizas bidireccionales y de casetones	Posibles deformaciones (flechas) y grietas	Control de calidad mediante testigos según EH Control de movilidad de deformaciones y grietas
		Corrosión de armaduras metálicas o armaduras	Control de velocidad de la corrosión. Posible comprobación de estado tensional
Estructuras rial trianguladas, planas y espaciales	Perfiles metálicos	Posibles deformaciones	Control de calidad del mate- y de las soldaduras, según NEB-MV-103, 104 Si deformaciones, comprobación y movilidad
		Oxidación o corrosión superficial Funcionamiento de nudos y articulaciones (20%)	Si corrosión, alcance
Membranas tensadas	Madera	Posibles deformaciones	Control de calidad de madera según UNE-56.540
		Existencia de fendas	Si deformaciones, comprobación y movilidad
		Posible erosión biológica	Si erosión biológica, alcance
		Integridad de apoyos y nudos Protección contra el fuego	Protección contra el fuego de cada elemento según NBE-CPI
	Mallas de cables	Integridad de anclajes(100%) y nudos (20%)	Control de calidad de cables según UNE-36.725 Posible comprobación de estado tensional de cables (20%)
	Telas	Integridad de anclajes (100%)	Control de resistencias según UNE-53.243
		Integridad y limpieza de la tela	Posible comprobación de estado tensional de tela y cables

Capítulo 2

CIMENTACIONES

1. GENERALIDADES

Las intervenciones en la cimentación de los edificios mediante recalces son probablemente tan antiguas como la construcción misma. Las primeras noticias que tenemos se remontan a la antigüedad clásica. Los griegos tenían un verbo que se refería concretamente al acto de reforzar cimentaciones y, de hecho, el término recalzar proviene del latín “recalceare”, que significa “reparar los cimientos de un edificio ya construido”.

La razón de esto quizá resida en el hecho de que, constituyéndose el suelo como parte esencial de la estructura del edificio, sin embargo es el único elemento que no se proyecta ni se diseña, sino que viene dado para hacer de él la base de apoyo del edificio. Por tanto, el control que históricamente ha tenido el arquitecto sobre este material esencial, siempre ha sido necesariamente más deficiente que el que pudiera tener sobre otros materiales como la piedra, la tierra cocida, la madera, el acero, etc, fabricados, modelados o transformados por las manos del hombre.

El suelo conforma un material heterogéneo, de constitución y naturaleza muy variable en ocasiones, de características igualmente variables según la profundidad, los estratos, el lugar. Asimismo, sus cualidades pueden modificarse enormemente en periodos de tiempo relativamente breves cuando se dan determinadas condiciones o transformaciones de agentes exteriores o interiores. Si a esto añadimos el tardío desarrollo de la Mecánica del Suelo y de sus técnicas de reconocimiento y estudio, que permiten una elección y diseño de la cimentación más apropiados y con menos riesgo de fracaso, se comprende que el 60 por 100 de los daños en edificios históricos o artísticos correspondan a las cimentaciones. Igualmente se comprende que desde el siglo IV a.C., cuando se lleva acabo el recalce del templo de Delfos, el primero del que se tiene constancia, hasta hoy día, la historia de la construcción esté plagada de casos de intervenciones más o menos acertadas en cimentaciones de edificios: intervención en el templo de Porta Capena, en el priorato de Perrecy les Forges (s.XI), en las murallas visigóticas de Carcasona (s.XIII), en las torres de Gloucester y Salisbury y en la catedral de Wells (s.XIV), en la colegiata del Sar y en la catedral de Santiago de Compostela (s.XV), en la fachada de la Basílica Vaticana y en la torre de San Martín de Teruel (s.XVI), en el monumento a Washington (s.XIX), las catedrales de Winchester, Canterbury, Lincoln, Exeter, San Pablo, Estrasburgo, Mainz, la torre de Pisa, las obras para el metro de Nueva York (s.XX), etc. Durante la segunda mitad de este siglo se inicia la aplicación intensiva de técnicas modernas con base científica para la reparación de cimentaciones.

La diversidad de estas técnicas permite afrontar la reparación de cimientos bajo condiciones de trabajo que pueden variar mucho de unos casos otros, pero al

mismo tiempo establece como primer problema la selección adecuada del sistema de intervención dentro de los límites de cada caso. Estos límites pueden ser, un escaso conocimiento de la concepción estructural del edificio o de sus condiciones reales de resistencia, el valor histórico o artístico del inmueble, las condiciones de espacio y accesibilidad a las zonas de trabajo, los medios materiales o económicos disponibles, la existencia de substratos de valor arqueológico, etc. Todas estas circunstancias deben ser sopesadas para determinar cuáles son las prioridades en cada caso y qué técnicas aplicables en otros edificios podrían quedar excluidas por sus consecuencias en el edificio que se estudia.

Por último, hay que hacer notar que el término “recalce” debería perder la connotación negativa que generalmente se le atribuye relacionándolo con edificios “mal hechos” o “defectuosos”, ya que la necesidad de recalzar un edificio no siempre es imputable a la falta de previsión del Arquitecto. De hecho, cada vez es más frecuente proceder a reforzar los cimientos de algunos edificios para poder aumentar las sobrecargas que soportan debido a cambios de actividades en su interior, para excavar sótanos debajo o en sus proximidades, para poder alterar el entorno del edificio, etc.

2. IDENTIFICACIÓN DE LOS DAÑOS

La primera lesión que se produce en un edificio cuya cimentación no es o, en un momento dado deja de ser, competente para desempeñar su función es un asiento excesivo. Pero muy raramente se detecta un proceso patológico originado en la cimentación a partir de la identificación directa de un asiento, dado que los cimientos de los edificios no suelen estar a la vista. Sin embargo, los asientos excesivos y no previstos de la cimentación dan lugar a otras lesiones como desplomes, giros, grietas y fisuras. Por esto, los síntomas más usuales que permiten detectar el proceso lo constituyen las lesiones secundarias, que tienen como causa originaria un asiento y que permiten localizarlo e identificarlo de manera indirecta.

El mayor problema, una vez recopilados todos los datos de los síntomas, es analizarlos y deducir una conclusión acertada sobre el proceso patológico que sufre una cimentación, ya que no todos los daños son **sintomáticos**, es decir, no todos señalan a la cimentación como causa primaria de forma inequívoca. Un giro o un desplome acusado puede constituir un daño sintomático, pero una grieta o una fisura puede no tener relación alguna con la cimentación y estar originada por un proceso diferente. Sin embargo, una determinada disposición de las grietas en los elementos constructivos sí puede constituir un daño sintomático e indicar sin ningún género de duda un fallo de la cimentación.

De aquí la importancia de llevar a cabo una recopilación exhaustiva y ordenada de los datos y las circunstancias que afectan al edificio que permita un estudio y análisis de la manera más clarificadora posible.

Los síntomas más corrientes son los siguientes:

2.1. ASIENTOS

Un asiento consiste en un movimiento de descenso del plano de apoyo de la cimentación de un edificio debido a la deformación del suelo que se encuentra bajo este plano y que soporta las tensiones producidas por el peso del edificio. El suelo, como cualquier otro material y como cualquier estructura, se deforma bajo carga. Deformación que, salvo en casos de suelos con características especiales, se estabiliza al cabo de un tiempo si no aumentan las cargas. Por esto todos los edificios asientan en mayor o menor medida en sus primeros años. El proyectista diseña y dimensiona la cimentación en función de las características del suelo y de la rigidez del conjunto del edificio para que estos asientos sean admisibles y no provoquen daños significativos. Por tanto, el problema no es que el edificio asiente, sino que la magnitud de los movimientos de la cimentación sea tal que dé lugar a deformaciones inadmisibles y a lesiones en otros elementos del edificio. Los asientos tienen como síntomas característicos desplomes, giros, deformaciones excesivas, grietas y fisuras.

Según el lugar de la cimentación donde se produzca el asiento excesivo podemos distinguir entre asientos generales y asientos puntuales.

Los **asientos generales** son los que se producen de forma generalizada en todos los puntos de la cimentación del edificio. Cuando la magnitud de los desplazamientos es la misma o muy uniforme en todos los puntos hablamos de **asientos uniformes**, los cuales no suelen revestir mucha gravedad ya que, al desplazarse en conjunto todo el edificio, no se producen lesiones en sus elementos constructivos. De cualquier forma, un asiento uniforme puede constituir un grave problema si su magnitud es excesiva, como ocurre en algunos edificios antiguos de Ciudad de México debido a las capas blandas y profundas sobre las que se asienta (el Palacio de Bellas Artes de México, construido en 1904, ha asentado más de 3m). Peor es cuando se trata de **asientos diferenciales**, es decir, cuando unos puntos de la cimentación sufren un desplazamiento sensiblemente mayor que otros, en este caso los movimientos relativos de unas partes del edificio respecto de otras pueden llegar a producir graves lesiones en elementos constructivos o estructurales.

En otras ocasiones, debido a heterogeneidades en el suelo, los asientos excesivos no se producen en toda la cimentación sino en uno o varios puntos muy localiza-

dos, mientras que el resto de la cimentación no sufre movimientos apreciables. Se trata en este caso de **asientos puntuales**, los cuales son, al mismo tiempo y por definición, **diferenciales**.

2.2. GIROS Y DESPLOMES

Un desplome consiste en la pérdida de la verticalidad de un elemento y generalmente se refiere a elementos verticales estructurales como muros de carga o soportes. Un giro es un movimiento respecto de un punto o un eje de un elemento provocando su pérdida de nivel y de plomo. Los giros y desplomes pueden ser de elementos constructivos concretos de un edificio o pueden afectar a todo el edificio en conjunto.

En ocasiones, la deformabilidad del suelo y la rigidez y monolitismo del edificio dan lugar a un giro uniforme de todo el conjunto. Este giro de todo el edificio, al igual que los asientos generales uniformes, pueden no causar daños apreciables en los elementos constructivos, puesto que no sufren desplazamientos relativos entre ellos, pero puede afectar gravemente a la estabilidad del edificio, especialmente cuando se trata de torres en las que los giros globales son más corrientes que en otros edificios. En efecto, una pequeña excentricidad en el centro de gravedad de una torre, una falta de homogeneidad en la deformabilidad del terreno que la soporta o cualquier otra causa, puede producir un asiento mayor en un solo lado de la torre provocando, si tiene suficiente monolitismo, un giro de toda ella. Este giro contribuye a que la excentricidad del centro de gravedad sea mayor, lo cual provoca a su vez un mayor asiento diferencial, y así sucesivamente, pudiendo llegar a estabilizarse el proceso, o no. El caso más conocido es el de la torre de Pisa, aunque el más espectacular sea probablemente el del silo de Winnipeg (Canadá), el cual sufrió un giro de 25° en menos de veinticuatro horas con un asiento diferencial de 10,50 m.

2.3. GRIETAS Y FISURAS

Las grietas y fisuras constituyen una lesión generalizada en los elementos rígidos de edificios afectados por asientos diferenciales excesivos. La deformación de la estructura que estos asientos provoca, genera esfuerzos de tracción que da lugar a grietas y fisuras en elementos rígidos con poca o nula resistencia a tracción como muros o elementos de fábrica, hormigón insuficientemente armado, tabiques, etc. Estas grietas se producen siempre perpendicularmente a los esfuerzos de tracción por lo que mediante el estudio y análisis de su disposición y magnitud se puede deducir la manera en que se distribuyen las tensiones en los elementos constructivos afectados, la manera en que estos elementos se

deforman y, como consecuencia, la localización del punto o de los puntos de la cimentación que están sufriendo un desplazamiento o asiento.

En estructuras de muros de fábrica el asiento de un tramo central de muro, de una esquina, de un testero o de una fachada da lugar siempre a grietas con una forma característica en arco de descarga. Estas grietas suelen partir de las esquinas de los huecos próximos a la zona del asiento, ya que los huecos constituyen siempre puntos débiles en los muros, y se propagan con aspecto de “ondas” que parten del punto donde se ha producido el asiento, de forma similar a las ondas concéntricas que se producen en la superficie del agua al arrojar un objeto.

En estructuras de hormigón armado el asiento diferencial de una zapata produce esfuerzos no previstos que afectan, por su monolitismo, a todo el conjunto, aunque sólo se aprecian sus consecuencias en forma de fisuras en las secciones de elementos no preparadas para soportar el aumento de tensiones. Asimismo, aparecerán grietas en los tabiques cuando la deformación de los pórticos no sea tolerada por aquellos. Estas grietas en los tabiques tienen la misma disposición y apariencia en arco de descarga que las que se producen en las estructuras de fábrica, aunque pueda desviarse puntualmente debido a las armaduras.

En estructuras metálicas los asientos diferenciales no darán lugar a grietas ni fisuras en los elementos estructurales de acero, aunque trabajen de forma diferente a como se pensaron, pero si producirán grietas en elementos más frágiles como tabiques o dinteles.

En estructuras de entramado de madera la deformabilidad de sus elementos y nudos hacen de ellas estructuras isostáticas que admiten cedimientos de los pies derechos mucho mayores que estructuras más rígidas, sin que las tensiones soportadas por sus elementos varíen sustancialmente. De cualquier manera, una deformación excesiva de los pórticos provocará las mencionadas grietas en elementos frágiles como tabiques.

2.4. DESNIVELES Y FLECHAS

Los asientos diferenciales pueden provocar en ocasiones desniveles apreciables o pérdida de horizontalidad de los forjados, vigas o elementos horizontales del edificio. Cuando estos desniveles son apreciables a simple vista, generalmente la deformación de la estructura es tal que previamente ya han aparecido otros síntomas más llamativos como fisuras o grietas en tabiques, dinteles u otros elementos constructivos, salvo que la poca rigidez o la disposición de estos elementos les permita admitir dichas deformaciones. En cualquier caso una pérdida de horizontalidad de un forjado, una viga o un dintel, puede ser un dato muy clarificador de un proceso patológico en la cimentación de un edificio.

3. DETERMINACIÓN DE LAS CAUSAS

3.1. ERRORES DE PROYECTO

3.1.1. Errores de diseño

La aptitud de un suelo para cimentar en él no depende únicamente de sus características físicas y mecánicas. Ciertamente hay suelos en los que resulta más sencillo o más económico construir la cimentación que en otros. Sin embargo, estos otros pueden ser igual de aptos para soportar las cargas de un edificio si se escoge el sistema de cimentación adecuado, tanto a las propiedades del suelo como a las características del edificio.

Por tanto, el primer paso en el diseño de una cimentación es obtener un conocimiento del suelo que permita escoger el sistema más conveniente en cada caso, considerando conjuntamente otros factores que pueden llegar a tener una importancia primordial, como las características del edificio, la existencia de edificación en las inmediaciones, la existencia de infraestructuras subterráneas, etc. En caso de encontrarnos ante un proceso patológico que tenga su origen en la cimentación del edificio, será imprescindible comprobar si el diseño del cimiento ejecutado es o no apropiado para las circunstancias dadas.

3.1.2. Errores de cálculo

Son poco frecuentes pero no inexistentes y se pueden dar en cualquier momento del proceso, tanto en el establecimiento de los datos iniciales del problema como en el cálculo mismo o en la interpretación de los resultados. Estos errores, cuando suceden, suelen concretarse en errores en la evaluación de las acciones, errores en el establecimiento de hipótesis de carga, previsión de asientos de cálculo excesivos y no tolerados por la estructura, errores en el cálculo de los esfuerzos, errores en el establecimiento de las dimensiones de la cimentación y errores en la elaboración de soluciones constructivas.

3.1.3. Desconocimiento del suelo

La falta de conocimiento del suelo sobre el que se va a construir puede conducir a diseños incorrectos de la cimentación o a una mala elección de la cota de cimentación. Estos errores pueden provocar, en el mejor de los casos, un sobredimensionado y un consiguiente gasto innecesario en la cimentación y, en el peor, unas deformaciones excesivas del suelo con inevitables lesiones más o menos graves para el edificio. La falta de conocimiento del suelo necesario para proyectar una cimentación correcta y eficaz puede deberse a varias causas:

3.1.3.1. Falta de estudio geotécnico

Un estudio geotécnico es una fuente muy útil que nos informa con precisión sobre las características del suelo con que contamos. Su ausencia implica, por sí misma, falta de conocimiento. Incluso en el caso de suelos considerados conocidos, como son los suelos de aglomeraciones urbanas, pueden darse situaciones anómalas que no se detectan sin el estudio del suelo. A veces es un afán de ahorro injustificado lo que conduce a no encargar a un técnico cualificado la realización de este estudio, considerando que se conoce suficientemente el suelo y prefiriendo sobredimensionar la cimentación. Sin embargo, los trabajos necesarios para detener un proceso patológico iniciado por una cimentación inadecuada suelen ser tan caros que, a la larga, desbordan con mucho el posible ahorro obtenido al no realizar el estudio geotécnico. En la actualidad la normativa vigente obliga a realizar estudio geotécnico para todos los proyectos de edificación.

3.1.3.2. Mala interpretación del estudio geotécnico

La existencia de estudio geotécnico no garantiza un conocimiento suficiente del suelo si no se interpreta correctamente. Una mala interpretación de los datos del estudio puede conducir a conclusiones erróneas sobre las características del suelo o a no percatarse de posibles circunstancias negativas como la existencia de falsos firmes, la falta de homogeneidad del terreno, la existencia de nivel freático, de terrenos agresivos, etc.

3.1.3.3. Existencia de falsos firmes

Un falso firme es un estrato aparentemente resistente pero que no se puede considerar apto para cimentar sobre él. Esto ocurre, por ejemplo, con estratos resistentes pero de espesor insuficiente apoyados sobre otros estratos más blandos, con bolos erráticos, con galerías o cuevas no detectadas dentro de la zona de influencia de la cimentación, etc. Un conocimiento insuficiente del suelo puede dar lugar a tomar estos falsos firmes por firmes reales y cimentar sobre ellos, corriendo gran riesgo de que se produzcan asentamientos diferenciales en el futuro.

3.1.3.4. Falta de homogeneidad del terreno

Cuando el terreno es poco homogéneo, es decir, cuando sus características varían sensiblemente en puntos relativamente cercanos, un estudio demasiado somero que se limite a una pequeña zona donde el terreno tenga una resistencia apropiada, puede llevar a suponer que todo el área donde se va a construir es igualmente resistente y apta. Evidentemente, si esta falta de homogeneidad no se detecta y no se tiene en cuenta en el diseño de los cimientos, el asiento de la cimentación que se construya sobre zonas más blandas será mayor que el que se produzca en zonas más duras, con previsibles repercusiones negativas en el conjunto del edificio.

3.1.3.5. Terrenos agresivos

Determinados terrenos, como son los terrenos yesíferos, son químicamente agresivos al hormigón armado. El desconocimiento de las posibles características agresivas de un suelo conduce inevitablemente a no tomar las medidas de precaución adecuadas a la hora de cimentar en ellos con hormigón armado, provocando a la larga problemas de cimentación.

3.2. CALIDAD Y DURABILIDAD DE LOS MATERIALES

Más frecuente que los errores de proyecto es el empleo de materiales de calidad inferior a los previstos o a los necesarios, lo cual suele darse en algunas edificaciones antiguas realizadas con hormigones muy pobres, piedra suelta o cascote. Los materiales de mala calidad no suelen tardar en deteriorarse, pudiendo llegar a dejar de cumplir su función con el tiempo.

Otros materiales, aun siendo de buena calidad, pueden verse afectados por determinados factores y sufrir deterioro a largo plazo. Por ejemplo, los morteros pueden sufrir disgregación y los elementos pétreos alteración y meteorización. Esto puede ocurrir en casos de circulación de aguas agresivas o si la cimentación es muy superficial y pierde la protección prestada por el terreno de recubrimiento, quedando expuesta a los agentes atmosféricos.

La madera, en el caso de cimentación por pilotes de madera, puede sufrir pudrición en un período de tiempo relativamente breve cuando queda húmeda y expuesta al aire por descenso del nivel freático, aunque la gravedad de la pudrición depende fundamentalmente de la longitud del pilote afectada y del terreno que lo rodea.

Aunque el empleo de elementos metálicos de cimentación es muy poco usual, cuando se utilizan pueden sufrir oxidación y corrosión, aunque el proceso puede ser muy lento, salvo que se den corrientes de agua esporádicas o que haya oscilaciones del nivel freático.

Todos estos procesos a largo plazo tendrán que ser tenidos en cuenta como posibles al analizar procesos patológicos en la cimentación de edificios históricos.

3.3. DEFECTOS DE EJECUCIÓN

Tan importante como un buen diseño de la cimentación y una adecuada calidad de los materiales empleados es una ejecución correcta, dado que cualquier error en este proceso puede provocar fallos en la cimentación o facilitar la concurrencia de otras causas determinantes.

Cuando la cimentación se ejecute en hormigón armado, que es lo más frecuente, habrá que cuidar que el transporte, el vertido, la compactación y el curado se lleven a cabo de forma apropiada, teniendo en cuenta los factores que afectan a este material especificados en el capítulo correspondiente a patología de sistemas estructurales de hormigón armado.

3.4. ALTERACIÓN DE LA COMPETENCIA DE UN TERRENO

Como ya se ha dicho, las características de un suelo pueden variar mucho en un periodo de tiempo relativamente breve por la modificación de algunas condiciones internas o externas o por la intervención del hombre o de agentes naturales. Esto puede ser causa de que un terreno, apto en principio para soportar las cargas que un edificio le transmite a través de una cimentación correctamente diseñada, deje de serlo, dando lugar a deformaciones o empujes excesivos no previsibles dadas las características iniciales del suelo o, incluso, al colapso. Veamos las alteraciones más importantes.

3.4.1. Descenso del nivel freático

Diversas causas, tanto naturales (variación de las condiciones climáticas), como artificiales (ejecución de drenajes, explotación de los acuíferos subterráneos mediante excavación de pozos, riego excesivo del terreno del entorno) pueden dar lugar a un descenso del nivel freático, lo que produce un aumento del peso efectivo del terreno y la consolidación de los estratos arcillosos blandos. Esto se traduce a lo largo del tiempo en asentos y empujes no previstos.

3.4.2. Socavaciones y arrastres

La erosión interna de un suelo que se produce al arrastrar sus partículas por la acción de corrientes subterráneas naturales o por la rotura de conducciones de agua o saneamiento, provoca la formación de cavidades en el suelo que van descalzando los cimientos. El problema es generalmente difícil de detectar hasta que la dimensión de las cavidades subterráneas es tal que se produce el colapso del suelo, dando lugar a asentos repentinos, y ocasionalmente de gran magnitud, provocando efectos más o menos graves en los elementos soportados.

3.4.3. Deformación del terreno

Existen una serie de acciones no naturales que, llevadas a cabo en las proximidades de un edificio existente, pueden provocar, por influencia en el terreno sobre el que asienta, deformaciones no previstas en el proyecto. Las principales de estas acciones son:

3.4.3.1. Excavaciones junto al edificio

Toda excavación induce en sus proximidades asientos y movimientos horizontales que disminuye al alejarnos de la misma. Incluso empleando métodos de ejecución cuidadosos con entibaciones muy rígidas mediante pantallas “in situ” acodaladas o con anclajes activos, se producen estas deformaciones en el terreno adyacente, aunque muy rebajadas. La zona de influencia puede extenderse hasta una distancia del doble o el triple de la profundidad de excavación, de manera que cualquier edificio que se encuentre dentro de esta área de influencia sufrirá asientos diferenciales y movimientos horizontales de mayor o menor magnitud, los cuales podrán ser admisibles o no según sus características. En cualquier caso, una excavación próxima a un edificio deberá ser estudiada y realizada con sumo cuidado para no provocar daños en él.

3.4.3.2. Rellenos junto al edificio

En terrenos compresibles, los rellenos de tierras pueden afectar a su entorno originando asientos en la edificación próxima.

En edificios con cimentación superficial la deformación del terreno que produce el relleno próximo producirá inevitablemente asientos diferenciales de mayor o menor gravedad.

De manera análoga, en edificios con pilotes flotantes, la deformación del terreno hacia abajo provocará un rozamiento negativo en los pilotes más cercanos con un descenso desigual de los pilotes.

En edificios con pilotes trabajando por resientencia en punta la deformación del terreno no tiene, en principio, efectos directos sobre el pilotaje ya que éste no descansa sobre el terreno blando deformable sino en un estrato duro más profundo. Sin embargo, el peso del relleno produce en el suelo que rodea al pilote, un empuje lateral que puede no ser tolerado, por éste provocando su rotura.

3.4.3.3. Anclajes bajo el edificio

Los anclajes activos que a veces se emplean para anular los empujes que el terreno provoca en muros pantalla tratando de evitar los asientos y desplazamientos horizontales que provocan las excavaciones junto a otros edificios, pueden provocar daños equivalentes o incluso mayores a los que se pretende evitar. Esto es así porque el mecanismo de anclaje comprime el suelo que se encuentra entre los anclajes y el muro y descomprime el suelo a partir del bulbo de anclaje. Esta descompresión puede provocar asientos en la parte de cimentación que se encuentre en la zona de influencia. Por esto es una técnica peligrosa y para emplearla no basta con contar con el permiso explícito del propietario colindante sino que es preciso realizar un cuidadoso estudio del suelo, la distancia y profundidad de los anclajes y el efecto que puede tener sobre la edificación cercana.

3.4.3.4. Cambio de sistema de cimentación

Construir un edificio junto a otro con un sistema de cimentación diferente del existente puede provocar en ambos lesiones por la diferente manera de trabajar que tiene cada sistema de cimentación.

Esto puede ocurrir, por ejemplo, cuando se cimienta un edificio mediante losa junto a otro con cimentación por pilotaje. La losa inducirá asentamientos y rozamiento negativo en los pilotes más próximos del edificio existente, al tiempo que sufrirá un mayor cedimiento del suelo en la zona más alejada de los pilotes.

3.4.4. Alteración del terreno por vibraciones o percusión

Las vibraciones y percusiones repetidas pueden alterar el equilibrio del suelo, sobre todo en rellenos y suelos granulares flojos, que pueden sufrir asentamientos de gran magnitud. El origen de estas vibraciones puede ser muy diverso: circulación de tráfico pesado, explosiones y voladuras en excavaciones o canteras próximas, demoliciones, funcionamiento de maquinaria pesada, ejecución de pilotajes hincados, etc. La única manera de evitar posibles daños en edificios cercanos por alteración de sus materiales o del suelo sobre el que asienta, es limitando la cantidad y la magnitud de las vibraciones o percusiones. En algunos casos incluso, puede ser aconsejable reforzar edificios en mal estado si no se puede evitar la producción de vibraciones.

3.5. CAMBIO EN LAS CONDICIONES DE USO DEL EDIFICIO

No todos los procesos patológicos cuyo origen está en la cimentación de un edificio se deben a la falta de aptitud del suelo o a errores humanos en el proyecto o en la ejecución. Empieza a ser un hecho frecuente el aprovechamiento de edificios, sobre todo antiguos, para albergar actividades diferentes de aquellas para las que fueron proyectados. Nuevas actividades que pueden suponer un aumento general de las sobrecargas en el edificio, nuevas distribuciones interiores y, por tanto, nuevas hipótesis de carga posiblemente no contempladas en el proyecto, aumento de la superficie útil mediante la construcción de nuevas plantas sobre las originales o mediante la excavación de sótanos, etc. Aunque el diseño original, los materiales empleados y la ejecución de la cimentación fuesen correctos, los cambios en las condiciones de uso de los edificios y determinadas intervenciones en ellos pueden propiciar esfuerzos no tolerables para la cimentación o para el suelo, dando lugar al inicio de procesos patológicos. Por esto, a la hora de abordar el estudio de los daños de un edificio provocados por fallos de la cimentación, es fundamental conocer las condiciones de uso para las que fue proyectado el edificio y la existencia de intervenciones anteriores, en donde podemos encontrar la causa originaria del problema.

4. TÉCNICAS DE INTERVENCIÓN

4.1. TRABAJOS PREVIOS

4.1.1. Proceso de información

La recopilación de datos es esencial para poder establecer las causas que han originado el proceso patológico y explicar su evolución y su consecuencia en los daños observados. Proceso éste que tiene como único fin la elaboración de un proyecto de intervención correcto y apropiado cuya ejecución permita la estabilización del proceso de deterioro de la cimentación de un edificio. La recopilación no sólo debe ser exhaustiva, sino también sistemática y ordenada, de manera, que permita su análisis relacionando unos datos con otros para encontrar una explicación general satisfactoria. Un conjunto de datos desordenados dificulta enormemente su comprensión y puede dar lugar a conclusiones erróneas al no disponer de una visión global del conjunto.

4.1.1.1. Recopilación de antecedentes

Se trata de recopilar mediante documentos o testimonios, toda la información posible sobre el proyecto original del edificio y sobre circunstancias o hechos que lo hayan podido afectar directa o indirectamente a lo largo del tiempo transcurrido desde que se construyó.

En principio y siempre que sea posible, se debe intentar conseguir el proyecto original, que nos informa sobre la cimentación proyectada para el edificio (con la precaución de que no siempre lo construido coincide con lo proyectado) y todos los documentos que nos informen sobre usos anteriores, siniestros (incendios, terremotos, inundaciones, etc.) intervenciones o reparaciones llevadas a cabo anteriormente, etc.

Aparte de esto, es sumamente importante indagar sobre otras circunstancias que pueden ser decisivas para conocer el proceso patológico que afecta al edificio como:

- La existencia de edificaciones anteriores en el lugar de la actual y los motivos de su ruina o demolición.
- Modificaciones que haya sufrido el entorno inmediato del edificio: construcción de edificaciones adosadas o cercanas a nuestro edificio, excavaciones, construcción o cegado de pozos, fuentes o aljibes, derrumbe o abandono de sótanos y bodegas, recrecido o repavimentación de calles, introducción de redes de saneamiento o instalaciones urbanas, etc.
- Actuaciones en un entorno más amplio que hayan podido modificar el nivel freático: bombeo de pozos, construcciones subterráneas, construcción de embalses, etc.
- Investigación de posibles fugas en tuberías y atarjeas en el entorno del edificio.

- Documentación fotográfica que puedan aportar información sobre el estado del edificio y sus lesiones en épocas anteriores, lo cual nos puede informar indirectamente de la evolución de estos daños.
- Testimonios de personas que puedan completar la información documental obtenida o que puedan suplir la inexistencia de dicha información documental.

4.1.1.2. Inventario y control de daños

Antes de iniciar cualquier reparación debe conocerse el estado real del edificio. Para esto, suele ser conveniente realizar una **visita de inspección previa** y, posteriormente una o varias visitas de inspección de detalle. En la visita de inspección previa se trata de obtener una primera visión del problema y recopilar o elaborar la información más inmediata sobre el edificio, como su geometría (plantas y secciones) materiales empleados, registro de las lesiones detectables a simple vista. Asimismo, aunque no se disponga en este momento de datos y mediciones precisas, si el estado del edificio lo aconseja, se tomarán medidas preventivas como apeos o apuntalamientos, que garanticen provisionalmente la estabilidad del inmueble.

La información obtenida en la visita de inspección previa debe permitir elaborar un programa de inspección que permita conocer con todo detalle y precisión el estado actual del edificio y sus lesiones mediante posteriores **visitas de inspección de detalle**.

En éstas se detectarán los posibles daños que hayan pasado desapercibidos en la primera visita y se medirán la **forma, longitud** y, si es posible, la **profundidad de las grietas y fisuras** existentes, anotando la fecha de la medición. Es muy conveniente materializar estos datos gráficamente mediante el dibujo de los “mapas de grietas” (plantas, alzados y secciones), ya que así se obtiene una visión global de la forma y la distribución de las mismas que a veces no se puede obtener a simple vista. Además, conviene instrumentar y realizar pruebas para conocer su evolución a lo largo del tiempo o su posible estabilización. Esto se puede llevar a cabo mediante la colocación de testigos o tarjetones de yeso que se romperán si los labios de las grietas se abren. El problema de los tarjetones de yeso es que únicamente nos indican si las grietas se ha abierto o no, pero no nos informan de la medida en que se ha abierto desde la última inspección ni de otro tipo de movimientos. Por esto es preferible la colocación de puntos fijos y el control de su movimiento con extensómetros, que dan una medición precisa de la variación de la apertura.

Igualmente se medirán los posibles **desplomes** de elementos verticales y **desniveles** de elementos horizontales y su evolución a lo largo del tiempo.

El conocimiento de la variación de estas magnitudes, permite deducir la velocidad con que el edificio se está deteriorando y la urgencia de la reparación.

Asimismo permite tomar medidas de prevención cuando se considere necesario, si es que no se tomaron en un primer momento.

4.1.1.3. Reconocimiento de la cimentación

Cuando sea posible (generalmente sólo en cimentaciones superficiales) se llevará a cabo un reconocimiento directo de la cimentación mediante la apertura de calas o pozos en los puntos más significativos, que permitan comprobar las dimensiones reales del cimientto, la calidad de los materiales con los que se ha ejecutado, su estado de conservación, la humedad y las características del suelo a la profundidad del plano de apoyo. Se puede incluso tomar muestras del suelo y del cimientto para su estudio y análisis en laboratorio. Estas excavaciones realizadas en la base de un edificio pueden debilitar o descalzar elementos estructurales o facilitar los desplazamientos de zonas fisuradas o sueltas, por lo que será preciso tomar medidas preventivas que garanticen la seguridad de los trabajos y que eviten mayores perjuicios al edificio.

4.1.1.4. Estudio geotécnico

Es muy recomendable llevar a cabo un estudio geotécnico para conocer las características del suelo en estratos inferiores y el nivel freático, incluso cuando ya existe dicho estudio previamente, por conocer posibles variaciones.

En cimentaciones profundas no suele llevarse a cabo este reconocimiento directo por su complicación y carestía por lo que se recurre únicamente al estudio del suelo.

4.1.2. Proyecto de intervención

Tras el proceso de obtención de información, estudio y análisis de la misma se debe estar en condiciones de establecer las causas que han originado el proceso patológico y explicar su evolución y su efecto en los daños observados. Este diagnóstico es esencial para deducir la solución y la ejecución más convenientes y definir detalladamente en un proyecto de intervención las actuaciones que deberán llevarse a cabo para, en primer lugar, eliminar las causas que originaron las lesiones y, posteriormente, reparar dichas lesiones. No hay que olvidar que, salvo que las causas hayan desaparecido por sí mismas y, por tanto, el proceso haya sufrido una presumible estabilización definitiva, en cuyo caso se procedería directamente a la reparación de los daños, la eliminación de las causas es imprescindible para que las lesiones no vuelvan a reproducirse en el futuro. En algunos casos especialmente graves que afectan a edificios de gran valor, no basta siquiera con detener y estabilizar el proceso de degradación de la cimentación sino que restituir al edificio a su posición primitiva recuperando los desplazamientos producidos, como fue el caso del templo de las Capuchinas en Méjico.

En un proyecto de intervención en la cimentación de un edificio, se prestará especial atención a la definición de las medidas preventivas necesarias (apeos, apuntalamientos, acodalamientos) las cuales pueden llegar a ser más complicadas de ejecutar que la misma reparación del cimiento.

4.1.3. Ejecución de la intervención

4.1.3.1. Obras auxiliares

Generalmente las obras de intervención en cimentación requieren llevar a cabo con anterioridad al inicio de la intervención propiamente dicha obras auxiliares. Dado que la ejecución de los recalces suponen, salvo excepciones, un debilitamiento de los cimientos hasta que las obras concluyen, estas obras auxiliares consistirán en la construcción de una estructura provisional que garantice la estabilidad y la resistencia de las partes del edificio afectadas y, sobre todo, la seguridad de los operarios durante los trabajos. Incluso cuando los medios empleados para recalzar la cimentación no impliquen su debilitamiento, la velocidad con la que progresa el deterioro del edificio puede aconsejar la estabilización del proceso antes de que el recalce sea efectivo.

La función de estas estructuras auxiliares y provisionales es, por tanto, transferir los cargas que actúan sobre la parte de cimiento afectada por la intervención a puntos firmes del entorno. Suelen consistir en apeos, apuntalamientos, acodalamientos y entibaciones, bien de madera (material ligero, versátil y que permite una facilidad de ensamble, montaje y desmontaje) o bien de puntales metálicos telescópicos (que facilitan el proceso de descarga y puesta en carga) aparte de otros elementos metálicos como pernos, bridas, clavos, etc.

En cualquier caso, las estructuras auxiliares deben ser **estables y resistentes** a las acciones previstas (verticales y horizontales) y deben permitir una **correcta sujeción** sin deterioro del elemento que sustenta, una **puesta en carga y descarga gradual** y la ejecución de los trabajos de recalce con el mínimo estorbo.

4.1.3.2. La intervención en la cimentación de un edificio

Las obras de intervención en cimentación precisa una especial atención, que implica un cuidadoso seguimiento de los trabajos con el fin de tomar decisiones ante cualquier situación imprevista.

Estas situaciones imprevistas no tienen porqué ocurrir si se vigila con continuidad el estado de los apeos y mecanismos de puesta en carga y la evolución de las lesiones, tomando las medidas necesarias si se aprecia una aceleración o una evolución no deseada del estado de degradación del edificio. Para esto se comprobará a intervalos de tiempo suficientemente breves la dimensión de grietas, fisuras, desplomes y desniveles existentes, verifican-

do la posible aparición de nuevas lesiones, durante todo el tiempo que dure la ejecución de las obras.

4.1.3.3. La puesta en carga

Salvo en los casos de refuerzo mediante inyección de la cimentación o del terreno, cuando se concluyen las labores de recalce y los nuevos elementos han adquirido la resistencia necesaria (caso del hormigón armado) generalmente es necesario proceder a la puesta en carga de la cimentación reforzada. Este es el proceso por el que la cimentación recalzada, que durante la intervención ha permanecido descargada por el empleo de apeos o estructuras auxiliares, comienza de nuevo a trabajar y a transmitir el peso del edificio al terreno.

Se trata de una operación muy delicada que debe llevarse a cabo de forma progresiva y controlada para que en ningún momento puedan producirse desplazamientos o concentraciones de tensiones no deseados al provocar una situación de carga no prevista, y para garantizar al mismo tiempo el trabajo efectivo de los elementos de refuerzo.

Las puestas en carga suelen ejecutarse, bien mediante el retacado de las juntas horizontales entre elementos nuevos y viejos con morteros expansivos o bien mediante gatos hidráulicos, los cuales en ocasiones se dejan perdidos.

Hay soluciones de recalce en las que no se lleva a cabo la descarga previa del cimiento antiguo. En estos casos la puesta en carga de los elementos añadidos para refuerzo no se puede producir de forma artificial y controlada sino a través de los movimientos que sufra el edificio hasta que estos elementos trabajen eficazmente, movimientos que podrán ser aceptables o no pero, en cualquier caso, no convenientes ni deseados.

4.2. ACTUACIONES EN EL TERRENO

Las actuaciones sobre el terreno tienen como fin la mejora de sus características geotécnicas, lo cual permite al mismo tiempo disminuir su deformabilidad y, en consecuencia, los asentamientos del edificio. Esto puede interesar en tres casos:

- Para **cimentar en terrenos no competentes** cuando se va a construir un edificio de nueva planta y la capacidad portante del terreno es muy baja, se puede tratar de mejorar ésta para diseñar y dimensionar una cimentación a partir de las nuevas características del terreno mejorado.
- Para **recuperar la capacidad portante del terreno**, que ha podido perder por diversas razones.
- Para **aumentar la capacidad portante del terreno** cuando la cimentación se encuentra en buen estado pero no ha sido bien dimensionada para las características del terreno o se prevé un aumento de las cargas que hacen que un terreno, en principio apto por sus características deje de serlo.

La elección del sistema más apropiado requiere un estudio detallado de las condiciones existentes y una evaluación de las posibilidades de éxito. Veamos los más utilizados.

4.2.1. Compactación

La compactación del terreno provoca la eliminación de los huecos existentes y la disminución de su porosidad contribuyendo a aumentar su densidad,

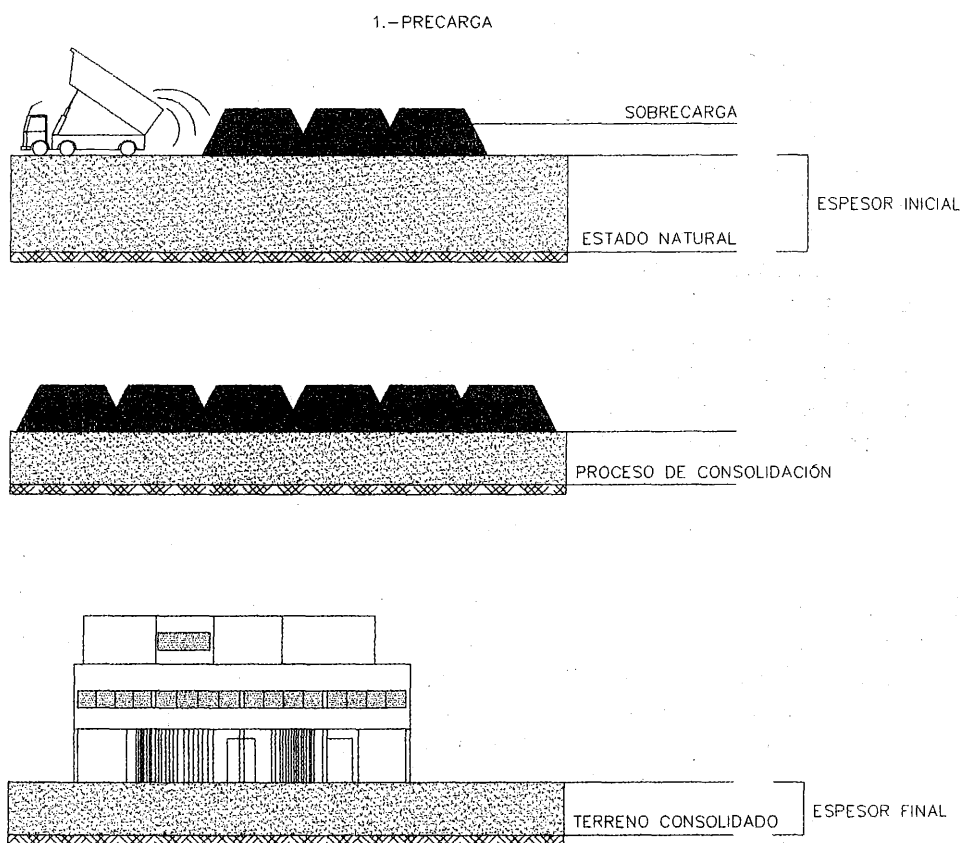
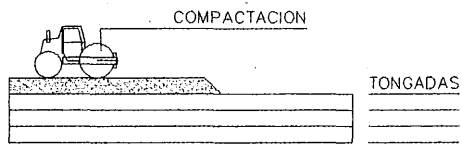
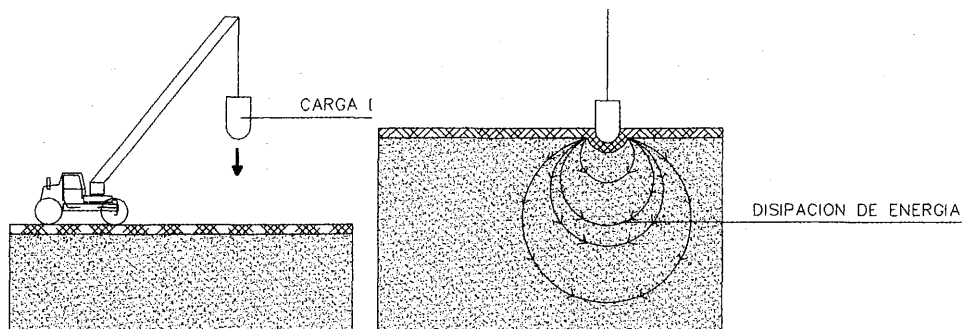


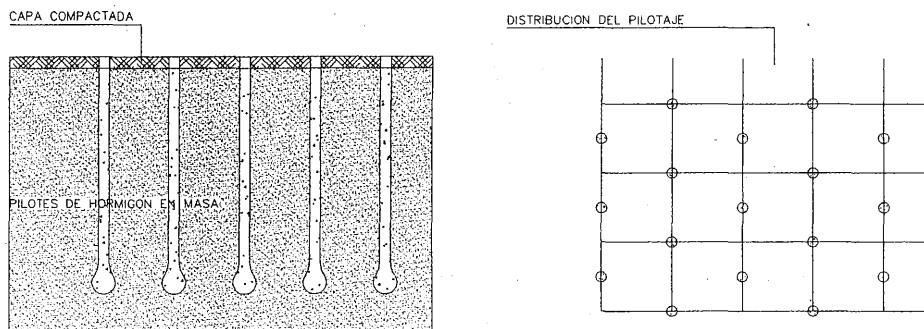
Fig. 2.1. Sistemas de actuación sobre el terreno: Compactación con precarga.



a. Compactación estática



b. Compactación dinámica.



c. Compactación mediante pilotes.

Fig. 2.2. Sistemas de actuación sobre el terreno: compactación estáticas, compactación dinámica y compactación mediante pilotes.

resistencia y cohesión y rebajando por tanto su deformabilidad. Los sistemas de compactación no deben utilizarse nunca en la mejora de suelos bajo la cimentación de edificios existentes, sino únicamente para mejorar suelos sobre los cuales vaya a construirse, ya que las vibraciones que inevitablemente se provocan pueden contribuir a empeorar gravemente el estado del edificio o de su cimentación. Se puede llevar a cabo por:

- Precarga.
- Compactación dinámica.
- Pilotes.
- Explosivos.

4.2.2. Inyecciones

Consisten en la introducción en el terreno de un fluido que permita, según el mecanismo elegido, mejorar las características resistentes de un suelo. Esto se puede lograr por cementación del terreno, por relleno de los poros y huecos de un terreno o por compactación del mismo. La gran ventaja de las inyecciones frente a los recalces es que permiten su ejecución sin necesidad de apelar la estructura, eludiendo, por tanto, la puesta en carga posterior. Distinguiamos:

- **Inyecciones de consolidación o cementación:** tienen como finalidad cementar un terreno al inyectar una mezcla que le dota de cohesión y rigidez por fraguado hidráulico o por reacción química. De esta manera se puede mejorar el apoyo de cimentaciones existentes o cohesionar cimentaciones antiguas. Cuando se pretende que la consolidación sea definitiva, se utiliza lechada o mortero de cemento, pero cuando se trata de una consolidación provisional que permita la ejecución de un recalce, o en casos de suelos de muy baja penetrabilidad se puede recurrir a algunos productos químicos que permiten mayor penetración, como el gel de sílice que endurece rápidamente.
- **Inyecciones de relleno:** aunque también conllevan cementación, su finalidad primordial es la de rellenar, colmatar y sellar los huecos de capas de terrenos formadas por materiales muy porosos, o en los que se ha producido arrastre de partículas por corrientes de agua subterránea o disolución. Este último fenómeno, conocido como karstificación, es frecuente en terrenos yesíferos. Para esto se inyectan lechadas de bentonita-cemento o de poliuretanos, es decir, mezclas que tengan gran capacidad de absorción de agua.
- **Inyecciones de compactación:** consisten en la inyección de una mezcla suficientemente viscosa y a la presión necesaria como para que desplace al material del terreno, modificando su estructura y dando lugar a una nueva más densa, compacta y resistente. Para ello se suele emplear un mortero de cemento de consistencia seca. La elevada viscosidad

del material de inyección, no le permite avanzar a mucha distancia del punto de inyección por lo que sus efectos y la amplitud de la zona inyectada se controlan mejor que con otros sistemas. Este sistema es apto para suelos arenosos, no para arcillas ni limos, en los que las altas presiones empleadas se transmiten inicialmente al agua intersticial, pudiendo producir su rotura.

- **Inyecciones mixtas:** consisten simplemente en la utilización combinada de más de uno de los tres tipos anteriores (como es el caso de jet cuanting). De hecho, ninguno de ellos constituye un mecanismo “puro” ya que sus límites no están claramente diferenciados en la mayoría de las ocasiones. Indudablemente las inyecciones de relleno y de compactación son también en parte inyecciones de consolidación, ya que se produce una cementación de zonas más o menos amplias del terreno. Al mismo tiempo las inyecciones de consolidación y las de compactación implican el relleno de los posibles huecos existentes en el terreno, etc.

La introducción del fluido se realiza a mayor o menor presión a través de tubos con manguitos cuya separación y profundidad de penetración depende de la amplitud de bulbo inyectado. Lo normal es aplicar mayor presión en la zona profunda y en el interior del bulbo inyectado que en la zona superficial y perimetral. Es difícil de establecer y controlar con precisión los límites y la homogeneidad del bulbo inyectado, ya que la penetración de los fluidos se produce más fácilmente por zonas más permeables y por grietas o fisuras del terreno, pudiendo llegar a ser muy irregular según sea la estructura del suelo inyectado. La inyección confinada permite eludir este problema. Consiste en la creación de un recinto cerrado alrededor del cimientado mediante una barrera formada por pantallas o tablestacas de manera que, al confinar el suelo bajo el cimientado, se evitan posibles desplazamientos laterales de aquel al tiempo que se limita y controla la zona de inyección y se garantiza su colmatación. En la inyección confinada los tubos de inyección deben atravesar el cimientado existente mientras que en la inyección abierta no es necesario.

El tipo de inyección y la elección del producto más apropiado dependen de las características del edificio existente, de su cimentación, de las tolerancias y asentamientos que admite, de las posibilidades económicas y de la naturaleza y estructura del terreno. Los suelos más apropiados para este tipo de tratamiento son los granulares gruesos en los que los huecos existentes permiten la penetración y difusión del fluido inyectado, la variedad de productos existentes en el mercado, la dificultad a la hora de establecer y definir el proceso de ejecución apropiado debido al amplio margen de incertidumbre con el que se trabaja y las consecuencias que puede acarrear un tratamiento por inyección incorrecto o mal ejecutado (asentamientos, rotura del terreno por presión hidráulica, levantamiento de soleras, giros o movimientos en elementos

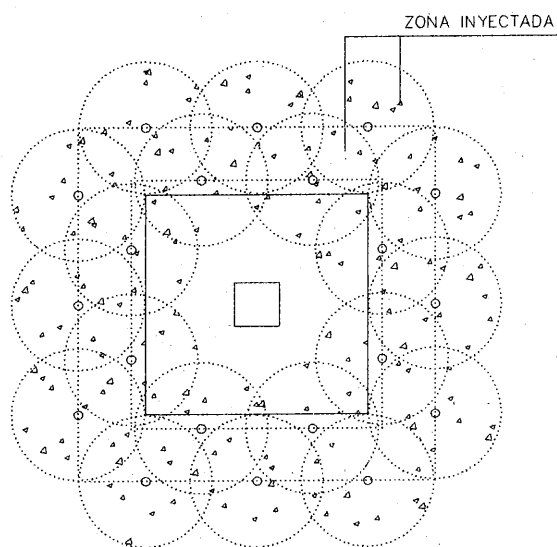
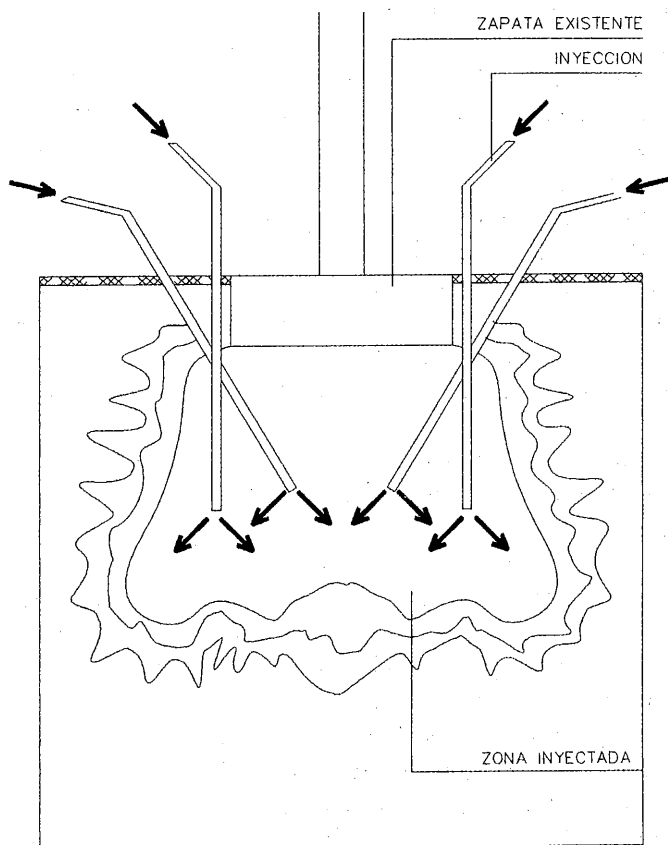


Fig. 2.3. Sistemas de actuación en el terreno: inyecciones abiertas.

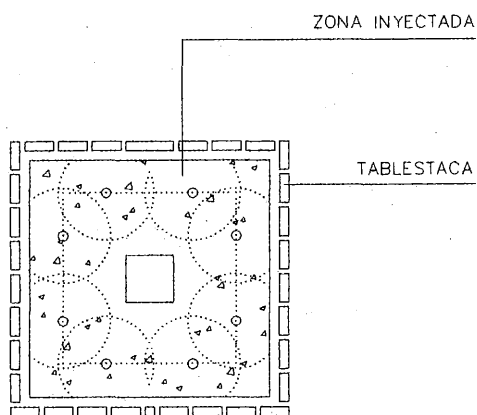
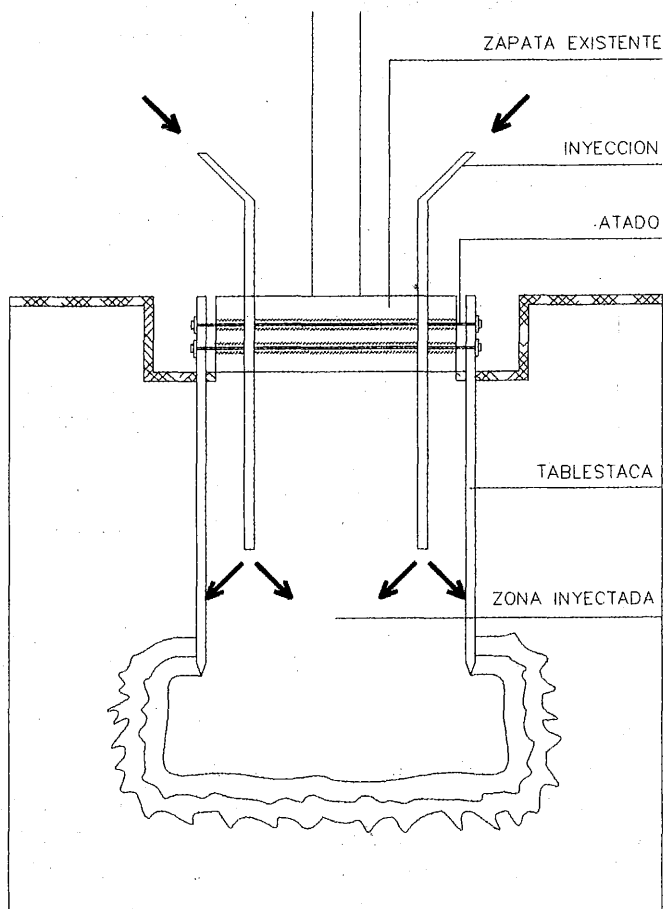


Fig. 2.4. Sistema de actuación en el terreno inyecciones confinadas.

estructurales o, simplemente, ineficacia del tratamiento) obligan a un estudio detallado y a una ejecución cuidadosa realizados preferentemente por empresas especializadas y experimentadas.

4.2.3 Drenajes

Como se ha visto, una elevación del nivel freático o la rotura de conducciones puede debilitar la resistencia del terreno provocando asentos, inestabilidad o degradación de cimientos. En estos casos, la mejora del terreno pasa por la eliminación del agua o por la limitación de la altura y variaciones del nivel freático. Esto se puede lograr de diversas maneras:

- Creando un recinto estanco alrededor del edificio, ya sea mediante la hinca de tablestacas de madera o metálicas o por realización de una zanja drenante.
- Creando una red de pozos drenantes bajo la solera del edificio, con el inconveniente del mantenimiento continuo que requieren los sistemas de bombeo.

En cualquier caso, la ejecución del sistema de drenaje debe realizarse cuidadosamente evitando provocar mayores asentos o inestabilidad en la cimentación.

4.2.4. Armados

Consiste en aumentar la cohesión y la resistencia a la deformación de un suelo mediante el hincado de barras metálicas formando una red tridimensional que cose el terreno. En muchas ocasiones, los mismos tubos utilizados para los tratamientos del suelo por inyección se dejan perdidos contribuyendo así a armarlo. En estos casos, los elementos de cosido, simplemente hincados, trabajan por rozamiento lateral y se denominan armado pasivo. Cuando las barras trabajan a tracción, cosiendo al terreno elementos de cimentación o contención (como es el caso típico del recalce de muros de contención o de pantallas) se denominan anclajes o armado activo. Aquí la tracción de las barras puede deberse a la simple entrada en carga del elemento de contención o provocada por un postesado.

4.3. RECALCES DE CIMENTACIONES SUPERFICIALES

Se orientan a la mejora de zapatas; distinguimos dos variantes zanjas y losas.

4.3.1. Recalces superficiales

Se caracterizan por tratar de mejorar las condiciones de cimentación limitando la intervención a niveles de profundidad próximos a los de los cimientos existentes o a niveles inferiores más apropiados pero a profundidades no elevadas. Según sean

el estado de conservación del cimientto y la dimensión necesaria actual de superficie de apoyo, el recalce deberá orientarse al aumento de ésta, a la reparación de la cimentación o, incluso, a su sustitución.

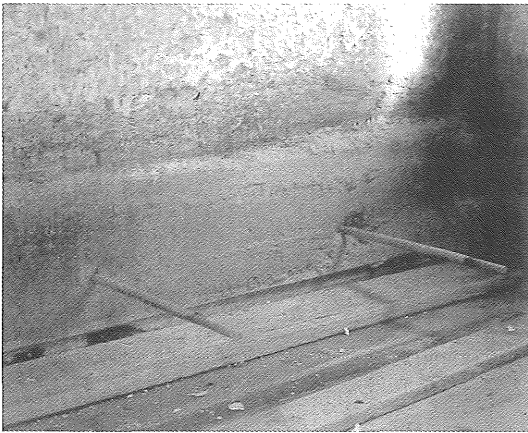
4.3.1.1. Reparación o refuerzo de la cimentación existente

Se lleva a cabo cuando la cimentación no tiene apoyo suficiente o se encuentra degradado. Esto suele ocurrir en zapatas de mampostería en las que, o bien no se ha empleado un mortero adecuado, o bien se ha producido un lavado. También es corriente en cimentaciones de hormigón de muy baja calidad o de mala granulometría en las que se puede producir su disgregación. La solución pasa por el refuerzo o reparación de ese cimientto que, por las condiciones de apoyo, es apropiado, pero por su estado de conservación o por su mala ejecución, no puede desempeñar la función para la cual se diseñó. Pueden ser:

- **Inyecciones:** se ejecutan de forma en todo similar a las inyecciones en el terreno de lechada o mortero de cemento, solo que en este caso los tubos se introducen en el macizo de cimentación para que la lechada rellene los huecos y cimente el material disgregado. Igualmente se puede confinar la inyección mediante una barrera de tablestacas (introducidas a presión mejor que a percusión por el precario estado del cimientto) que permita controlar el relleno del recinto. Además existe la variante de confinar la inyección mediante la construcción en el perímetro del cimientto de muretes de fábrica de ladrillo o de hormigón. Esto último presenta, frente a las tablestacas, la ventaja de evitar las percusiones y vibraciones de la hinca, pero el inconveniente de tener que excavar los laterales del macizo degradado con el peligro que conlleva de desmoronamiento.
- **Armado y postesado:** se trata de una solución utilizada sólo en el caso poco frecuente de zapatas de hormigón armado en las que la calidad del hormigón es adecuada pero el armado insuficiente, y únicamente si los daños se limitan a pequeñas fisuras, ya que en caso de rotura habrá que recurrir a un recalce o a la sustitución. Se ejecuta introduciendo la armadura de refuerzo en unos taladros practicados previamente en la zapata. Tras poner las barras en tensión para garantizar su trabajo conjunto con el resto de la zapata, se anclan en sus extremos y se inyecta el taladro con mortero de resinas epoxi.

4.3.1.2. Aumento de la superficie de apoyo

Se lleva a cabo cuando la cimentación, bien porque no se ha estimado correctamente la capacidad portante de la capa de apoyo, bien porque las características del terreno han sufrido modificaciones imprevistas o bien porque se prevé un aumento de cargas en el edificio. Consideramos las siguientes posibilidades:



2.4. Recalce de una cimentación mediante la ejecución de dos vigas perimetrales. La unión entre la cimentación antigua y la realizada se consigue por postesado de barras de alta resistencia.

a) Actuando en el contorno del cimiento: consiste en aumentar la base del cimiento por sus laterales manteniendo el mismo plano de apoyo. Este recrecido varía la proporción entre el vuelo del cimiento y el canto, pudiendo provocar esfuerzos de flexión nuevos y no previstos y cambiando, por tanto, la forma de trabajar de la zapata. Este problema derivado requiere necesariamente, bien el recrecido del canto del cimiento antiguo por su cara superior, o bien el aumento de la cuantía de armadura.

Lo principal de esta solución es garantizar la adherencia y el trabajo solidario del hormigón nuevo con el viejo. Contamos con diversos mecanismos para lograr que el conjunto funcione como un solo macizo:

- *Mediante armaduras o bulones* que atraviesen el hormigón viejo por taladros practicados en él previamente y relleno posterior de estos taladros con resinas epoxi. Los extremos de las barras introducidas quedarán embebidos en el hormigón nuevo. Cabe además la posibilidad de aumentar la adherencia entre los dos hormigones postesando las barras y anclándolas en sus extremos una vez que el nuevo haya fraguado y adquirido suficiente resistencia, pero para esto es necesario interponer entre el acero y el hormigón fresco un tubo o funda para que no se adhieran antes de efectuar el tesado y rellenar los taladros con epoxi únicamente después de poner las barras en tensión.
- *Labrando los laterales del cimiento antiguo* para darle forma de cuña o para que transmita las cargas por esfuerzo cortante mediante cajeado o dentado de la superficie lateral. En el caso de zapatas aisladas, la retracción del hormigón aumenta el efecto de zunchado no siendo necesario el cosido de los dos hormigones mediante armaduras como en la

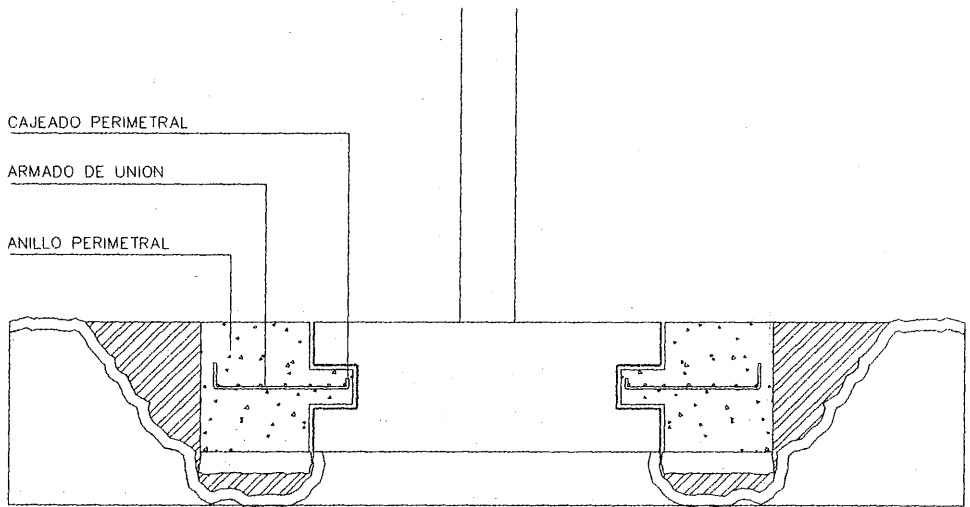


Fig. 2.5. Recalce superficial de zapata aislada aumentando la superficie de apoyo mediante anillo perimetral unido por cajeados laterales.

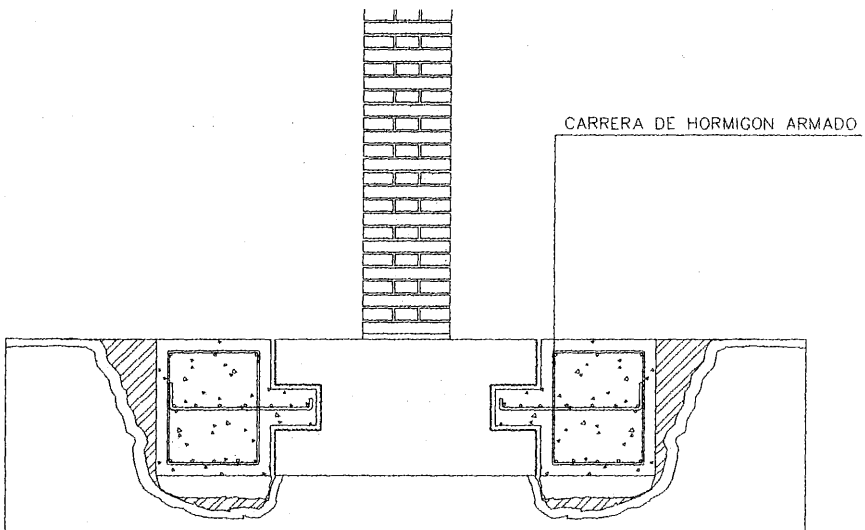


Fig. 2.6. Recalce superficial de zanja corrida aumentando su superficie de apoyo mediante carreras laterales unidas por calzados laterales.

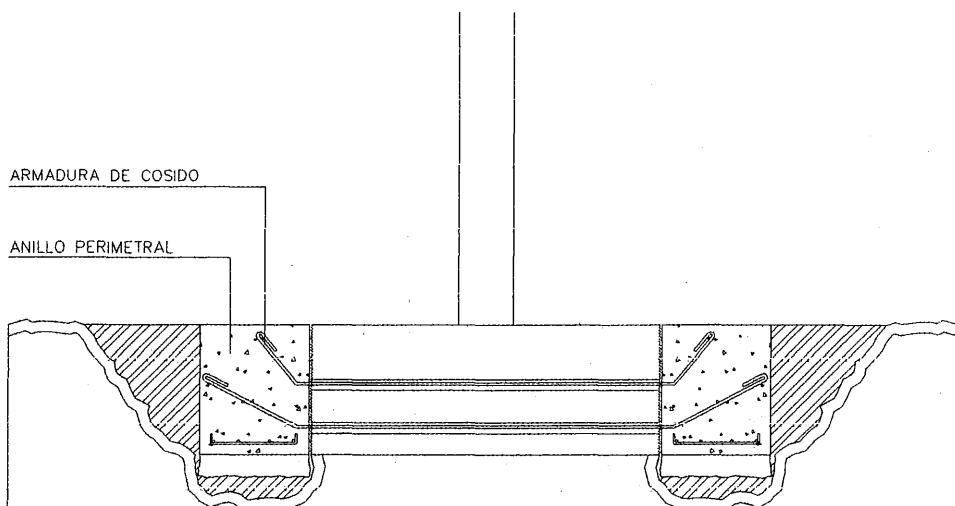


Fig. 2.7. Recalce superficial de zapata aislada aumentando su superficie de apoyo mediante un anillo perimetral unido por armaduras pasantes.

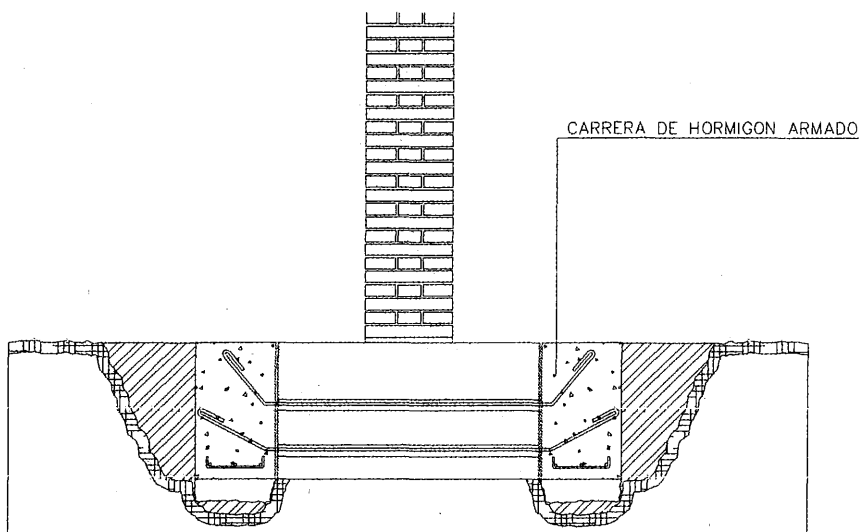


Fig. 2.8. Recalce superficial de zanja corrida aumentando su superficie de apoyo mediante carreras laterales unidas por armaduras pasantes.

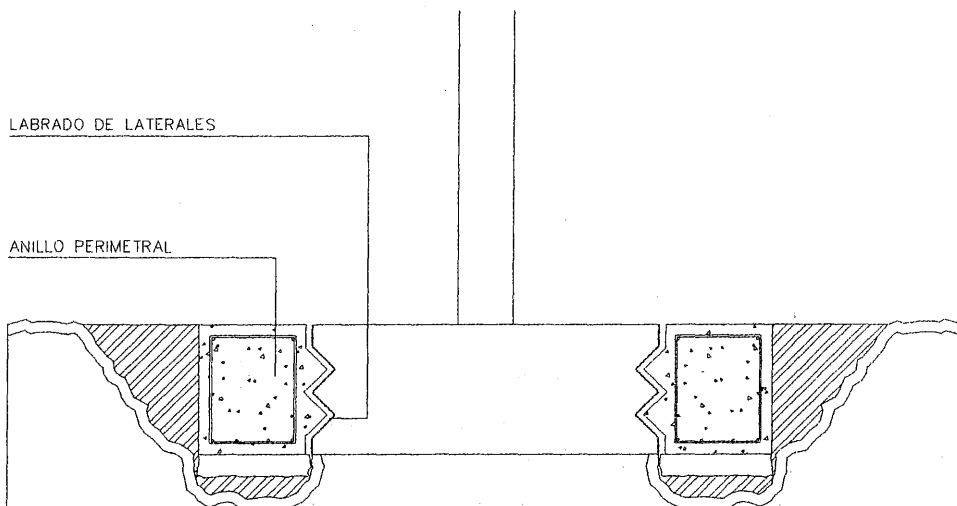


Fig. 2.9. Recalce superficial de zapata aislada aumentando su superficie de apoyo mediante un anillo perimetral de hormigón armado con dentados laterales.

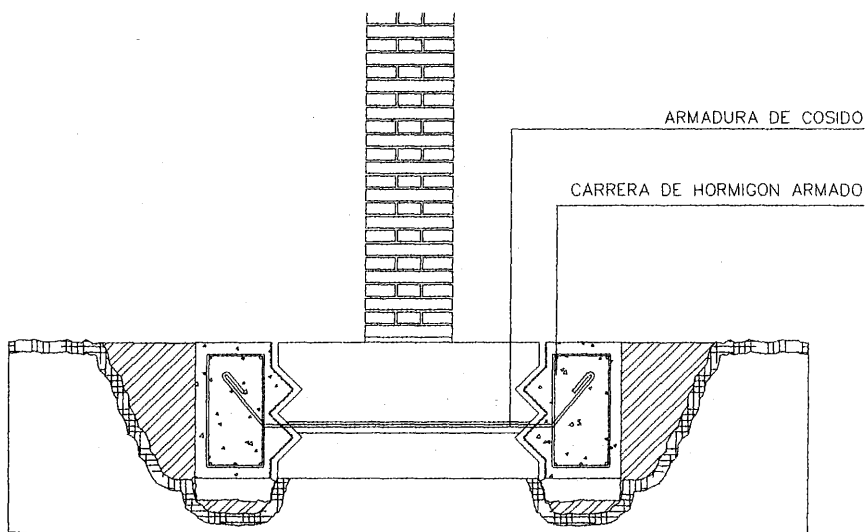


Fig. 2.10. Recalce superficial de zanja corrida aumentando su superficie de apoyo mediante carreras perimetrales de hormigón armado y armadura de cójido pasante.

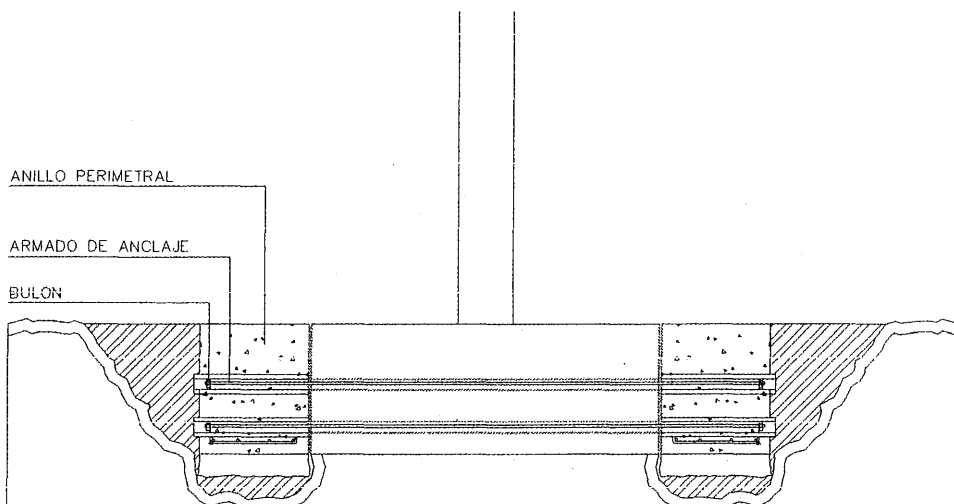


Fig. 2.11. Recalce superficial de zapata aislada aumentando su superficie de apoyo mediante un anillo perimetral unido por armaduras pasantes con bulones y postesadas.

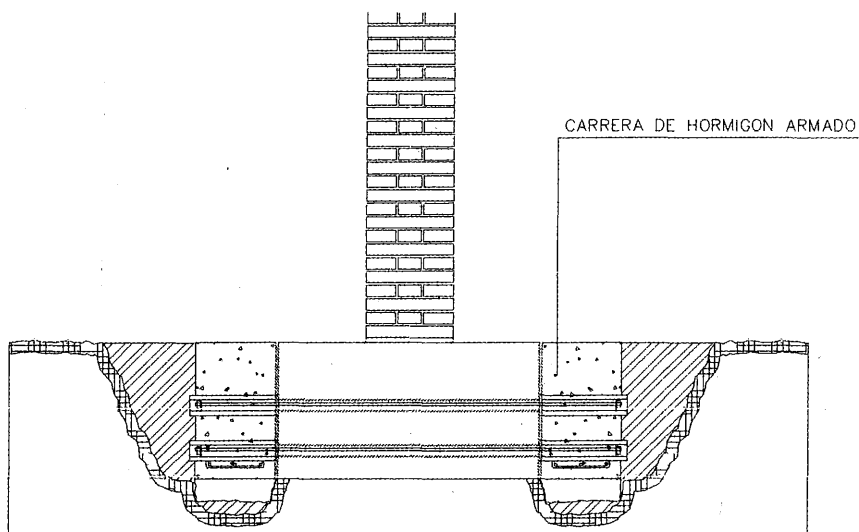


Fig. 2.12. Recalce superficial de zanja corrida aumentando su superficie de apoyo mediante carreras laterales de hormigón armado unidas por armaduras pasantes con bulones y postesadas.

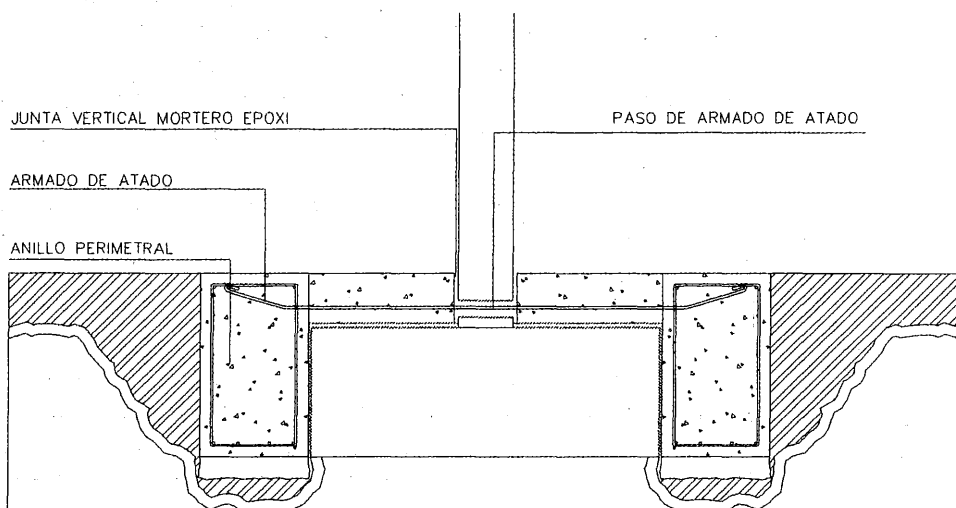


Fig. 2.13. Recalce superficial de zapata aislada aumentando su superficie de apoyo mediante un anillo perimetral de hormigón armado unido por armaduras de atado superiores.

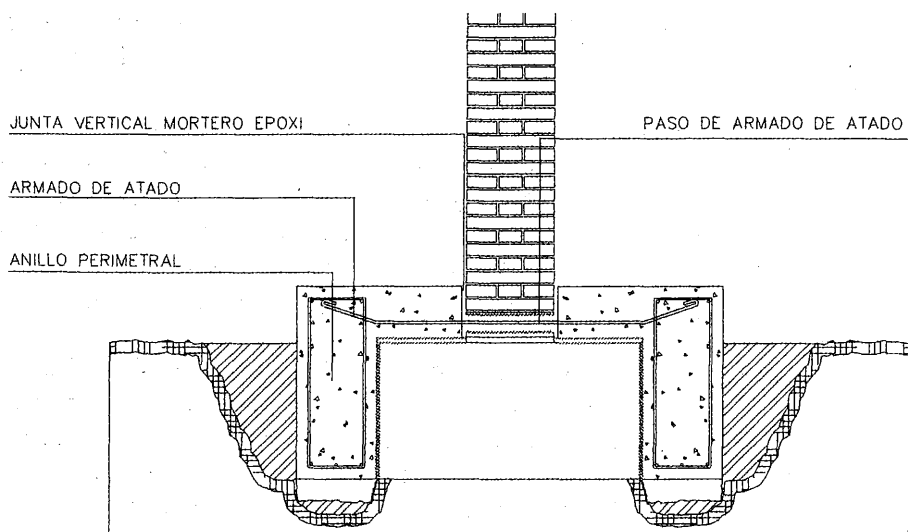


Fig. 2.14. Recalce superficial de zanja corrida aumentando su superficie de apoyo mediante carreras laterales de hormigón armado unidas por armaduras de atado superior.

solución anterior, aunque sí lo será en el caso de zapatas corridas en las que los recrecidos no constituyen un anillo cerrado sino dos piezas independientes por lo que no se produce el efecto de zuncho.

- *Recalzando el cimiento antiguo en el perímetro*, con lo que la transmisión de esfuerzos queda garantizada sin necesidad de coser con barras los dos hormigones.

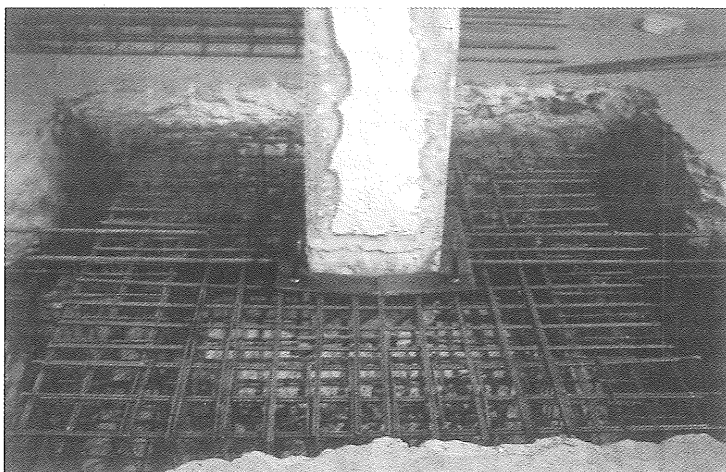
En cualquiera de las tres soluciones es imprescindible una preparación que consistirá en el picado y limpieza de la superficie del cimiento antiguo que quede en contacto con el hormigón de recrecido. La preparación será aún más completa si se impregna la superficie de contacto con resinas epoxi antes del hormigonado.

La principal ventaja de esta operación es la seguridad con que se cuenta al no tener que descalzar el cimiento existente pudiendo prescindir del apeo de la estructura. Como contrapartida, no queda garantizada la entrada en carga inmediata de la parte nueva, siendo necesario para que esto ocurra, que se produzca cierto asiento de la zapata, cuya imprevisión puede acarrear graves consecuencias para el edificio.

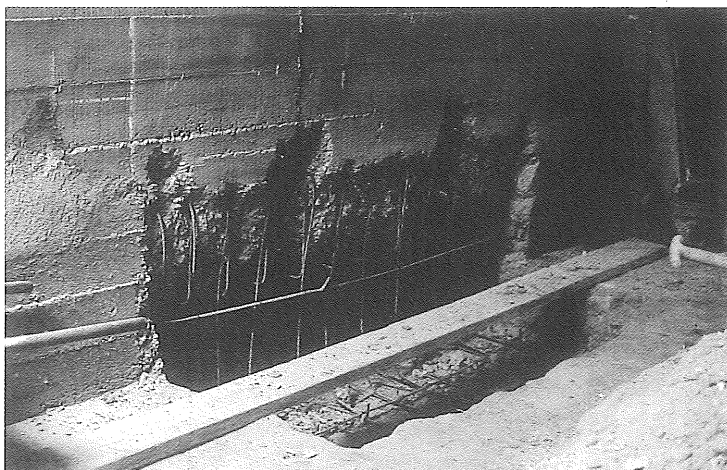
b) Actuando en el plano inferior del cimiento: consiste en recalzar la zapata antigua con una nueva construida debajo y que tenga las dimensiones suficientes. La solución es muy eficaz, ya que la transmisión de cargas al nuevo elemento y la disminución de la presión efectiva sobre el terreno están garantizadas, pero la ejecución es más compleja y delicada ya que es ineludible descalzar, aunque sea en parte, la cimentación existente y llevar a cabo la puesta en carga final.

En el caso de zapatas aisladas, el primer paso es apea la estructura para descargarlas todo lo que sea posible. Esta operación no suele ser necesaria en el caso de zapatas corridas ya que el muro funcionará como arco de descarga al descalzarlo parcialmente.

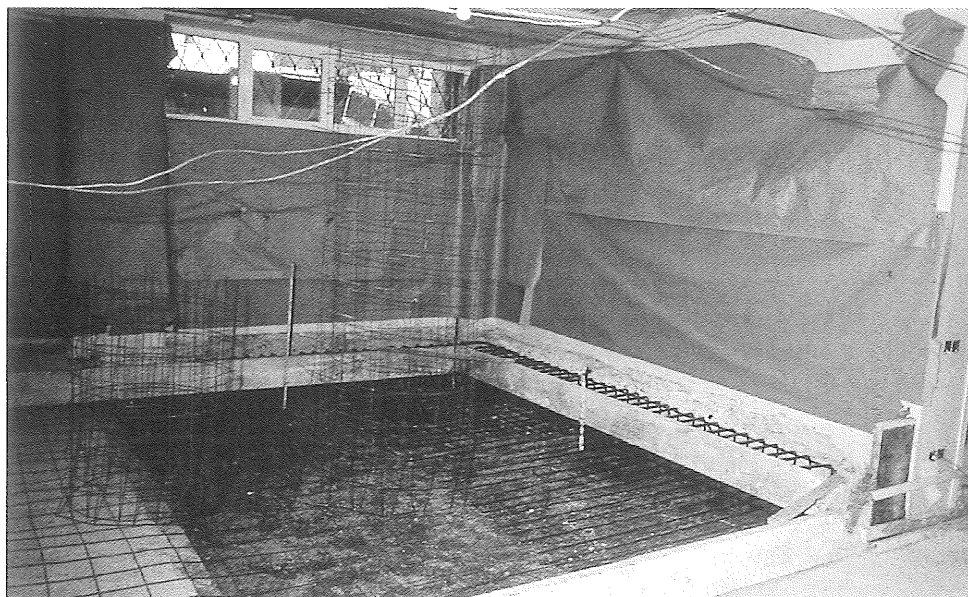
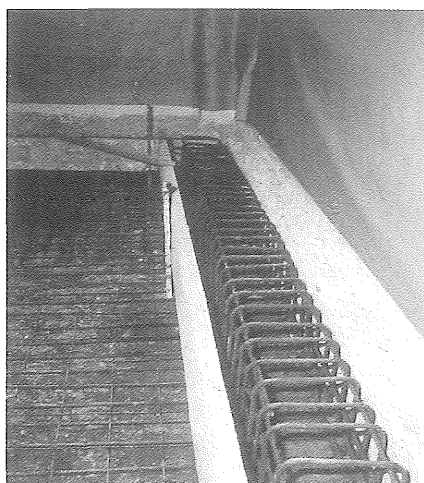
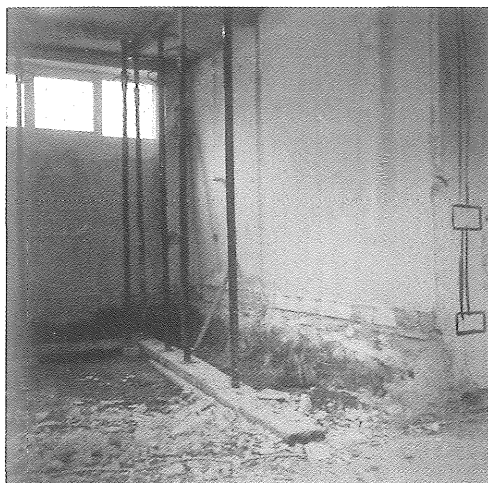
En cualquier caso y a pesar del apeo, se actuará por puntos o bataches, excavando, colocando la armadura nueva y hormigonando en fases sucesivas hasta completar todo el cimiento. Las armaduras deberán quedar en espera para conectar las diferentes fases de hormigonado, lo cual no deja de ser problemático ya que hay que evitar de alguna manera que las esperas queden embebidas en el hormigón fresco. Esto podría resolverse mediante algún cajeado o encofrado con taladros por los que puedan salir las esperas o bien dejándolas dobladas y pegadas al encofrado natural que constituye el terreno no excavado para, después de fraguado el hormigón, picarlo y extraer las esperas que han quedado embebidas. Además, cada fase de hormigonado debe concluirse con la no menos delicada operación de la puesta en carga, que suele realizarse rellenando la junta horizontal entre el hormigón viejo y el nuevo con un mortero ligeramente expansivo. La efectividad de este sistema es limitada ya que es difícil evaluar con precisión la expansividad que



2.2. Armado para el recalce superficial por recrecido de una zapata.



2.3. Recalce de un muro de contención.



2.4.a - 2.4.b. - 2.4.c. Recalce de una cimentación continua mediante el aumento de la superficie de apoyo con dos vigas perimetrales. La unión entre el hormigón fresco y el hormigón endurecido se obtiene con resinas epoxidicas.

requiere el mortero en cada caso.

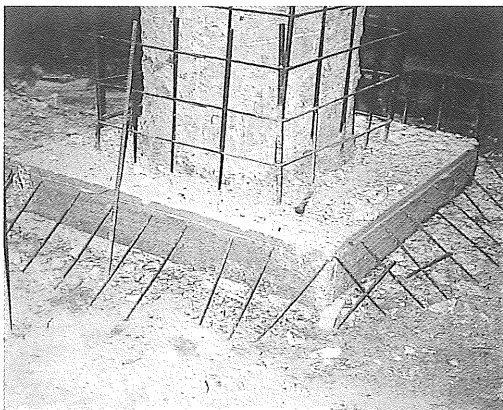
El conjunto de la operación deberá realizarse de forma muy controlada y aún así no será extraño la aparición de pequeños asientos.

c) Realizando losas de cimentación: viene a ser la misma solución que la del aumento de la superficie actuando en los laterales del cimiento, pero macizando con hormigón y con un armado apropiado todo el espacio existente entre las zapatas. Esto aumenta el área de reparto de las cargas, con lo que se consigue reducir los asientos en suelos de poca capacidad portante.

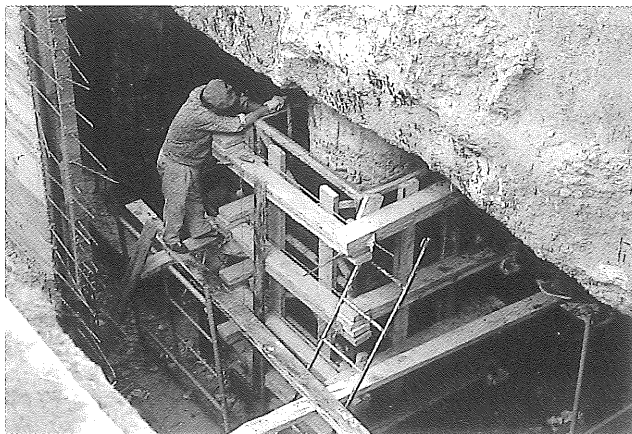
4.3.1.3. Sustitución de la cimentación existente

Cuando la reparación o ampliación de la cimentación no es viable, habrá que optar por la sustitución. Consideramos dos variantes:

a) Sustitución total: se lleva a cabo demoliendo el cimiento existente y construyendo otro en su lugar.



2.5.a-2.5.b Recalce de una cimentación profunda (mediante pozos) creando losas de cimentación para aumentar la superficie de apoyo y garantizando la estabilidad de los pozos con un zunchado perimetral.



En el caso de muros de carga con cimentación por zapata corrida, la sustitución debe llevarse a cabo por puntos. El proceso constructivo es muy similar al explicado en el apartado referente al aumento de la superficie de apoyo, actuando en el plano inferior del cimiento (apartado b, del punto 4.3.1.2.), con la única diferencia de que la nueva zapata no se construye debajo de la antigua sino en su lugar, tras haberla demolido. La demolición debe efectuarse cuidadosamente para no dañar el resto de la estructura.

En el caso de zapatas aisladas la operación es mucho más delicada ya que la superficie de apoyo de los soportes no suele ser suficientemente amplia como para actuar por puntos, debiendo llevar a cabo la demolición de la zapata antigua y la construcción de la nueva de una sola vez. Claro está que para ello es imprescindible apearse y descargar completamente el soporte (incluso de su propio peso) lo cual constituye la maniobra más delicada de toda la operación. Una vez llevada a cabo la misma de forma satisfactoria el resto es relativamente sencillo. La demolición debe realizarse siempre cuidadosamente para no dañar el pilar, dejando las armaduras del pilar en espera y reforzándolas si fuese necesario. Cuando el soporte es metálico, se puede realizar la puesta en carga con un relleno de mortero de cemento expansivo en la junta entre la zapata nueva y la placa de anclaje del soporte, pero si es un pilar de hormigón armado, como el hormigón nuevo debe quedar solidariamente unido al del pilar desde el primer momento, no hay más remedio que realizar la puesta en carga retirando los apeos progresivamente y con la mayor suavidad posible.

b) Sustitución funcional o puenteo: Consiste en construir una nueva cimentación en los laterales o perímetro de la existente y transmitiendo las cargas a la nueva cimentación mediante puentes de acero u hormigón armado, no teniendo en cuenta la forma de trabajo del cimiento antiguo. Al no eliminar materialmente la cimentación existente, que sigue funcionando durante la ejecución, la seguridad es mucho mayor que en la sustitución total, pudiendo, en muros de carga, eludir el apeo de la estructura. No así en el caso de soportes, cuyas reducidas dimensiones en planta obligan, como en la sustitución total, a descargarlo por completo, con lo que no se obtiene aparentemente ventaja alguna.

El puenteo se realiza abriendo mechinales en el muro para pasar a través de ellos las vigas de acero u hormigón armado, que apoyarán en los macizos de cimentación contruidos previamente a los lados del cimiento antiguo. En los apoyos del muro sobre los puentes, se dispondrán placas de reparto si la superficie de apoyo no es suficiente como para evitar excesivas concentraciones de tensiones en esos puntos. La puesta en carga se realizará relleno la junta entre el puente y el soporte con un mortero de cemento expansivo.

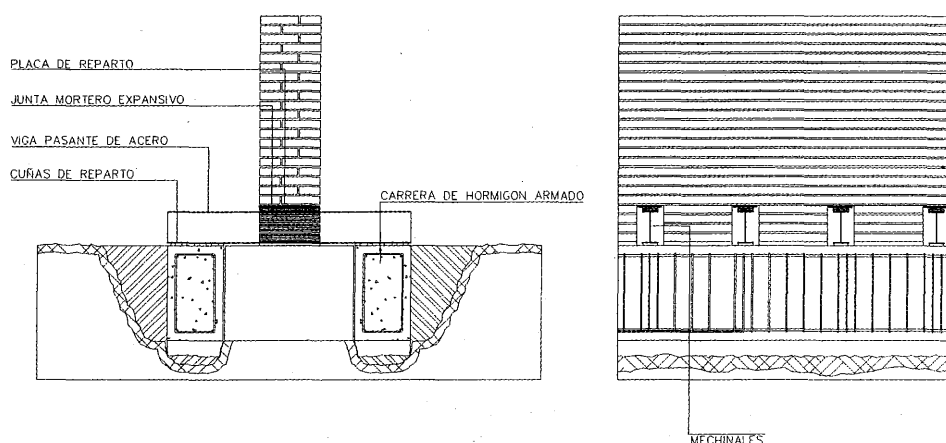


Fig. 2.15. Sustitución funcional o puenteo.

4.3.2. Recalces profundos

Por diversas razones (elección incorrecta de la profundidad de cimentación, aumento de cargas del edificio hasta superar la tensión admisible del estrato de apoyo actual) puede ocurrir que el terreno en el que descansa la cimentación existente no ofrezca garantías suficientes de éxito si se recurre a un recalce superficial, o que no sea posible o efectivo optar por mejorarlo mediante inyecciones. Entonces no cabe más solución que buscar un nuevo firme a mayor profundidad para apoyar en él el recalce de la cimentación existente. Por esto hablamos de recalces profundos para cimentaciones superficiales.

Es una solución igualmente necesaria, aunque la calidad del firme actual sea suficiente, cuando se proyecta construir un sótano bajo un edificio existente con cimentación superficial, lo cual suele darse con relativa frecuencia. Evidentemente, no hay más salida que trasladar las cargas del edificio a una nueva cimentación por debajo de la cota del sótano proyectado.

El recalce puede realizarse mediante:

4.3.2.1. Pozos

Se trata de un método tradicional, no mecanizado y que requiere mano de obra especializada. Consiste en la excavación de pozos por puntos, de forma simi-

lar a la actuación por puntos en un recalce superficial, cuya profundidad será la necesaria para alcanzar un nuevo firme. Se trata de una operación que conlleva riesgo para la seguridad de los trabajadores, por lo que deben tomarse todas las medidas que sean necesarias.

La anchura de los pozos varía entre 1,5 metros como máximo para la seguridad y 1 metro, mínimo para poder trabajar. La entibación debe ser cuidada y se va realizando al tiempo que se profundiza en la excavación. Si el terreno ofrece garantías suficientes, se irá retirando la entibación a medida que se vaya construyendo el nuevo macizo de cimentación y se vaya rellenando el pozo con hormigón o fábrica, en caso contrario se dejará perdida. No debe profundizarse nunca por debajo del nivel freático dado el peligro que ello conlleva y, en cualquier caso, no es aconsejable sobrepasar los doce metros de profundidad.

Los pozos pueden ser contiguos, aunque se ejecuten de forma alternada como los bataches, o aislados, si la cimentación antigua tiene la suficiente calidad como para puentear el muro. La separación entre pozos excavados simultáneamente debe ser tal que la carga que soporta el terreno adyacente no aumente más del 10%.

La puesta en carga se llevará a cabo cuando el cimientado nuevo haya adquirido suficiente resistencia, bien mediante gatos hidráulicos o bien retacando la junta entre el cimientado antiguo y el nuevo con un mortero de cemento expansivo.

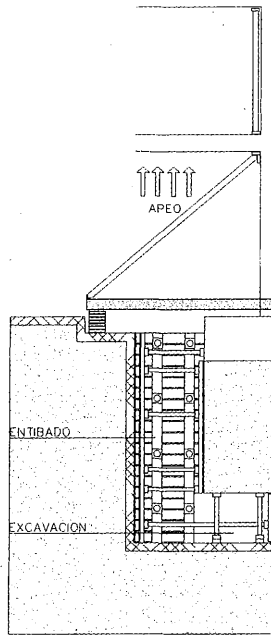
4.3.2.2. Pilotes in situ

Consiste en construir pilotes verticales (de diámetros entre 30 y 60 cm) a lo largo del perímetro de la cimentación existente para, a continuación, atar las cabezas con un encepado de tal manera que se garantice la transmisión de las cargas de la estructura al nuevo cimientado. El pilote debe excavarse con herramienta helicoidal, ya que cualquier otro sistema de ejecución puede producir vibraciones o impactos perjudiciales para el edificio.

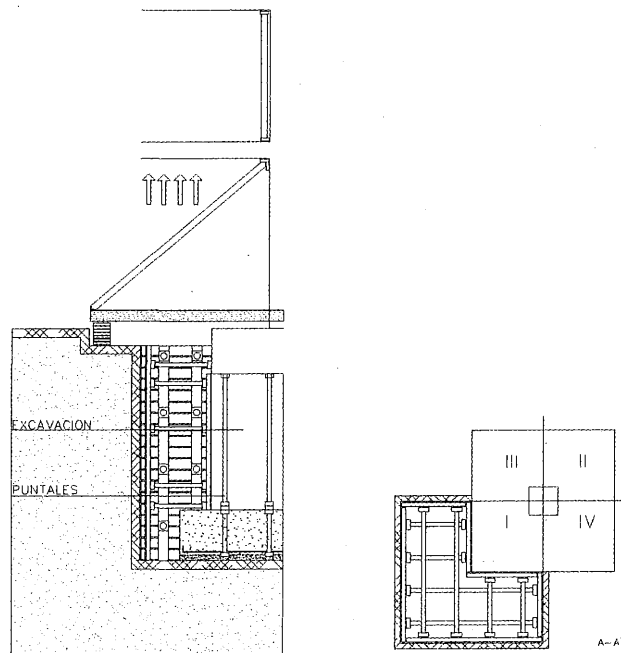
Se trata de un sistema apropiado para el recalce de zapatas corridas con grandes cargas y cuando, para encontrar un firme más profundo, hay que atravesar estratos poco consistentes o bajo el nivel freático. El gran inconveniente que en la mayoría de los casos suele ser decisivo, es la necesidad de contar con un espacio suficiente, sobre todo en altura, para meter la maquinaria necesaria para la ejecución de los pilotes.

Podrían distinguirse tres tipos de recalce con pilotes in situ según la manera de atar las cabezas de los mismos:

- **Con encepado continuo:** puede realizarse en zapatas aisladas, en las que el encepado puede abrazar el perímetro y la cara superior del cimientado existente. En cuanto a los diversos mecanismos que garanticen el trabajo solidario de zapata y encepado, es válido todo lo dicho en el apartado 4.3.1.2.b) referente al aumento de la superficie

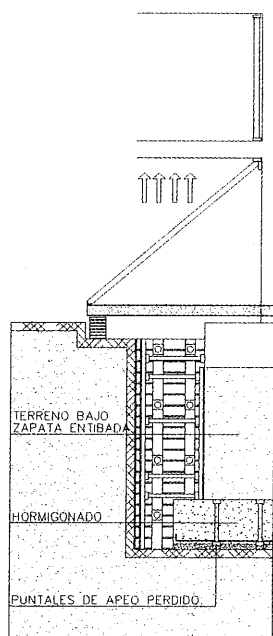


a. Proceso de entibado y excavación del batache I.

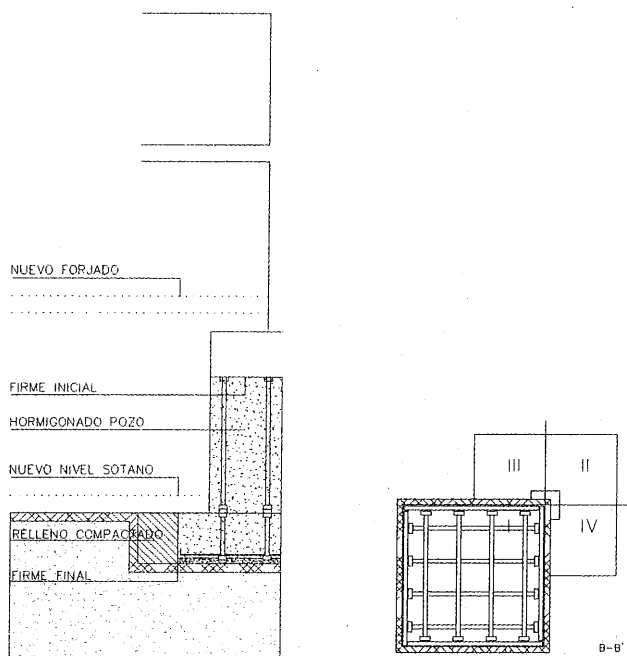


b. Hormigonado de la zona baja, el entibado tiene que permitir el transporte y puesta en obra del hormigón.

Fig. 2.16. Recalce de una cimentación superficial de zapata aislada mediante la ejecución de pozos de cimentación (recalce profundo)



c. Excavación del pozo.



d. Hormigón final del pozo y excavación hasta nuevo nivel.

de apoyo en cimientos actuando en los laterales, considerando que, en donde se hablaba entonces de hormigón nuevo, se refiere en este caso al encepado.

También se puede realizar un encepado continuo en el recalce de muros o zapatas corridas uniendo las vigas de atado de las cabezas de los pilotes a cada lado del muro por debajo del cimiento existente. Claro está que para esto es necesario descalzar este cimiento, lo cual no deja de ser delicado y engorroso, aunque garantiza absolutamente la transmisión de cargas al apoyar la estructura directamente sobre el nuevo encepado. La operación debe realizarse por bataches, descalzando franjas de cimiento de ancho variable según la consistencia del terreno y la calidad de la construcción existente. Puede hacerse uso, como medida de seguridad adicional, de enanos metálicos que sirvan de apeo provisional del cimiento y que quedarán perdidos en el hormigón del encepado.

- **Con encepado discontinuo:** suele utilizarse en el recalce de zapatas corridas si no se quiere optar por construir un encepado continuo por debajo del cimiento antiguo. En este caso las cabezas de cada fila de pilotes desplegados a los dos lados del muro irán atadas por vigas-carreras longitudinales. Al no poder abrazar todo el cimiento antiguo no se consigue un zunchado efectivo, por lo que las dos vigas deberán atarse mediante pernos o bulones introducidos a través de taladros practicados previamente que atraviesen la zapata, postesados y anclados a cada lado. Para garantizar con seguridad la transmisión de cargas al nuevo cimiento, los laterales de la zapata deberán ser labrados formando un dentado, cajeado o machihembrado.
- **Con vigas pasantes:** se trata de una solución idéntica en ejecución y consideraciones al puenteo o sustitución funcional expuesto en el punto 4.3.1.3.b. A él nos remitimos sin más que aclarar que las vigas pasantes o vigas puente sobre las que descansa la estructura antigua apoyarán, en este caso, no en nuevos macizos de cimentación sino en las vigas de atado de las cabezas de los pilotes o, incluso, directamente sobre esas mismas cabezas, aunque la construcción de la viga de atado siempre es recomendable para uniformar posibles asientos de los pilotes.
- **Con ménsulas bajo la cimentación:** se trata de una solución sofisticada en la que los pilotes se ejecutan sólo a un lado del muro, de manera que el encepado debe formar ménsulas sobre las que pueda apoyar aquél. Puede ser útil cuando, por escasez de la altura necesaria para la maquinaria en el interior del edificio, sólo se puedan ejecutar los pilotes en el exterior, por tanto, a un solo lado del muro, o bien, cuando sólo se puede actuar desde el interior por motivos de propiedad del suelo, como es el caso de los muros de medianería.

Normalmente, el momento que produce la excentricidad del apoyo de

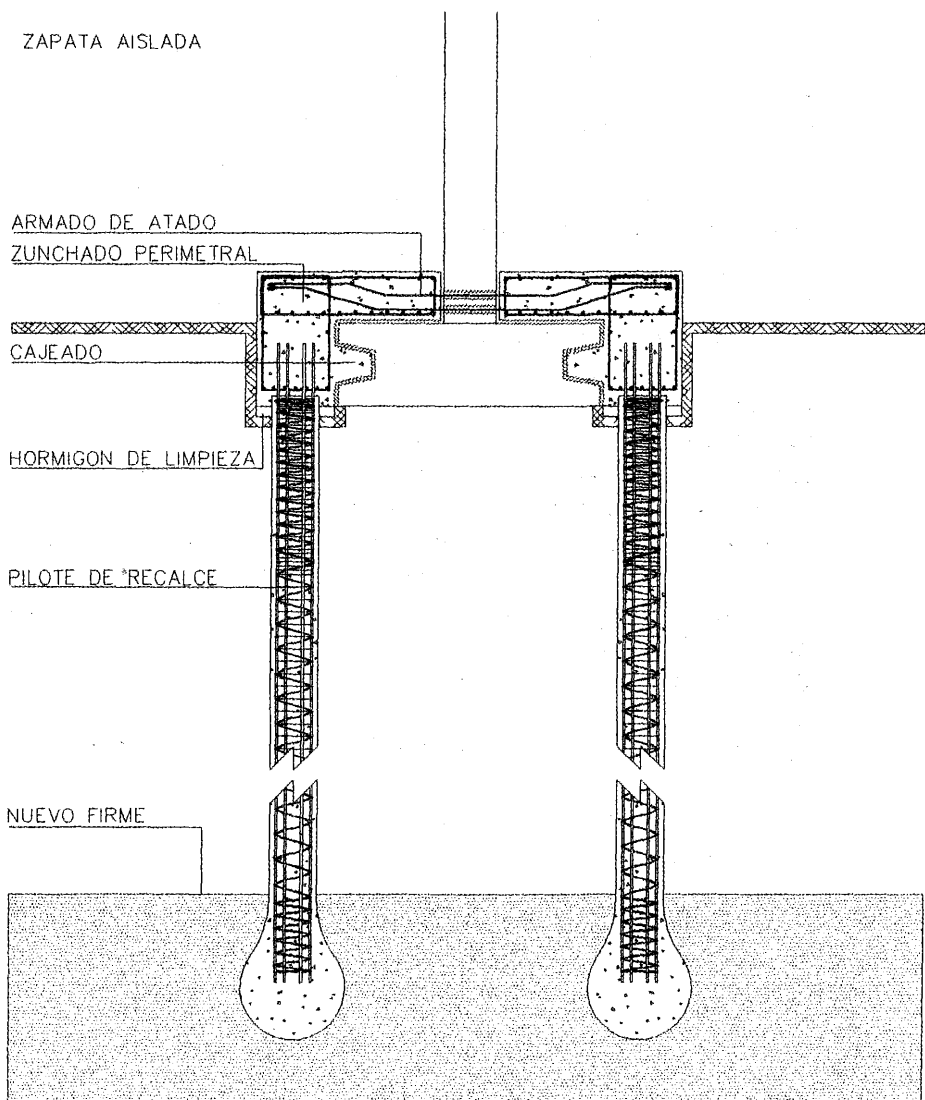


Fig. 2.17. Recalce profundo de cimentación superficial mediante "Pilotes" contruidos "in situ" y encepado superior.

ZAPATA CORRIDA

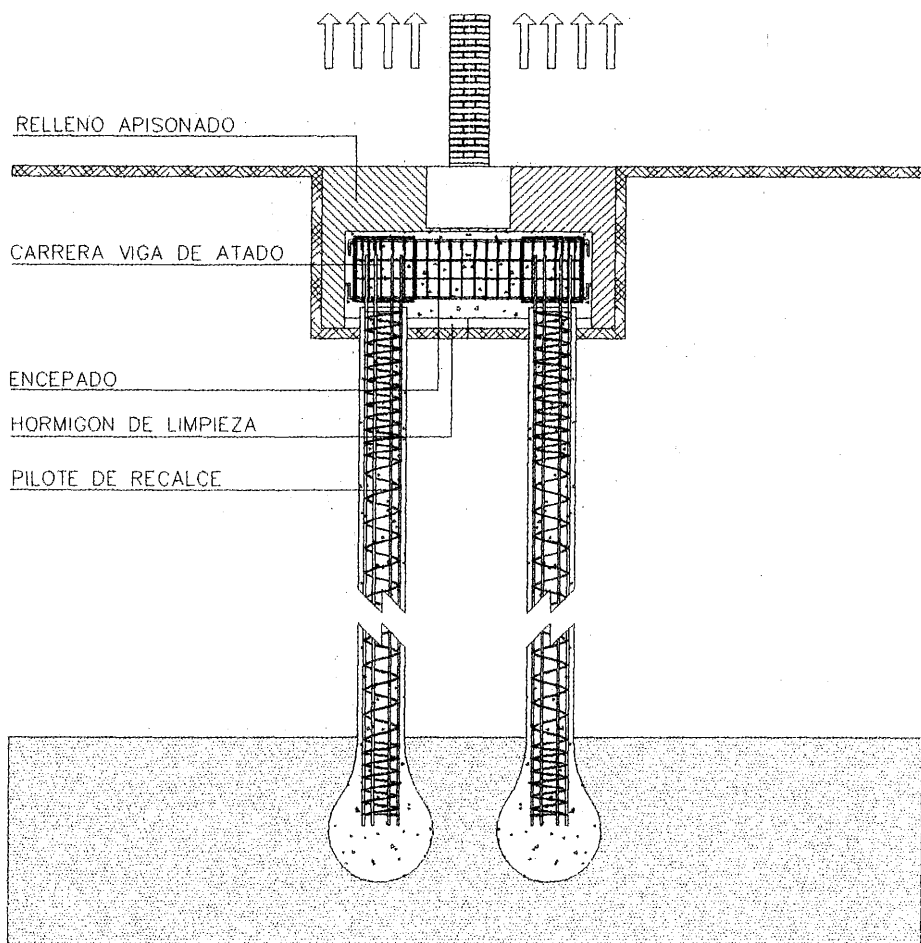


Fig. 2.18. Recalce profundo de cimentación superficial mediante "Pilotes" contruidos "in situ" y encepado inferior continuo.

ZAPATA CORRIDA

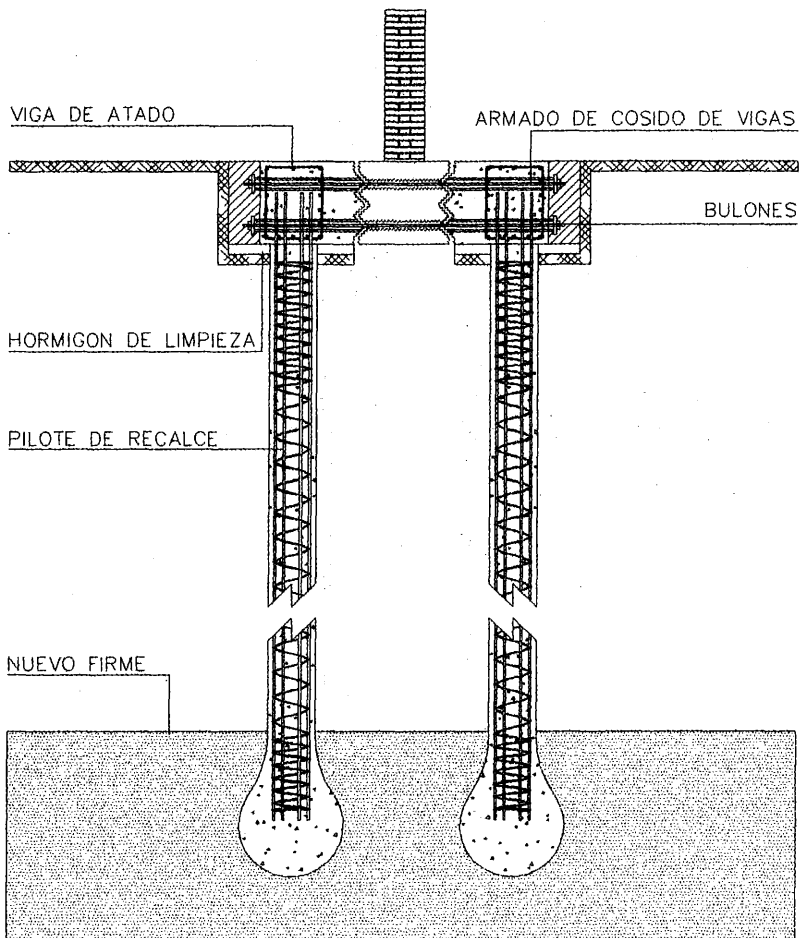
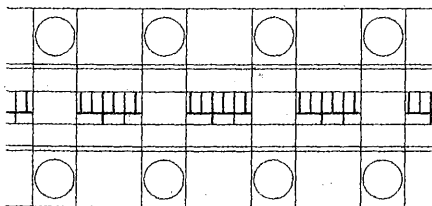
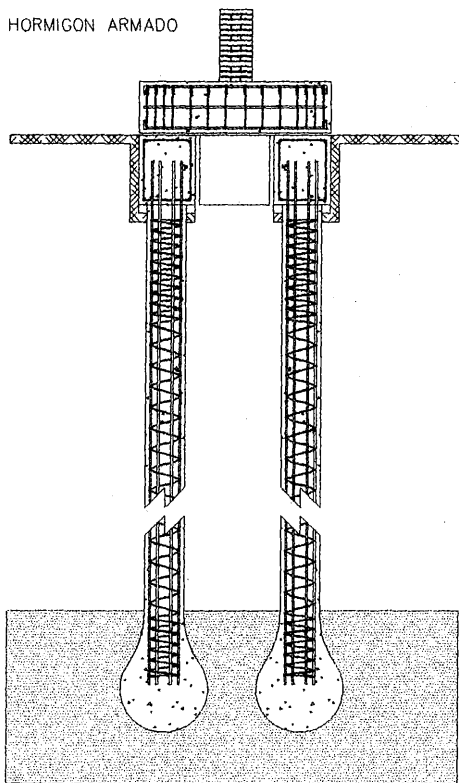


Fig. 2.19. Recalce profundo de cimentación superficial mediante "Pilotes" contruidos "in situ" y encepado discontinuo postesado.

a. Viga pasante de hormigón armado.

ZAPATA CORRIDA

HORMIGON ARMADO



b. Viga pasante metálica.

ZAPATA CORRIDA

METALICA

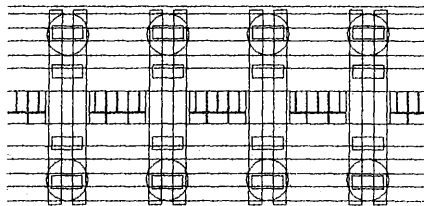
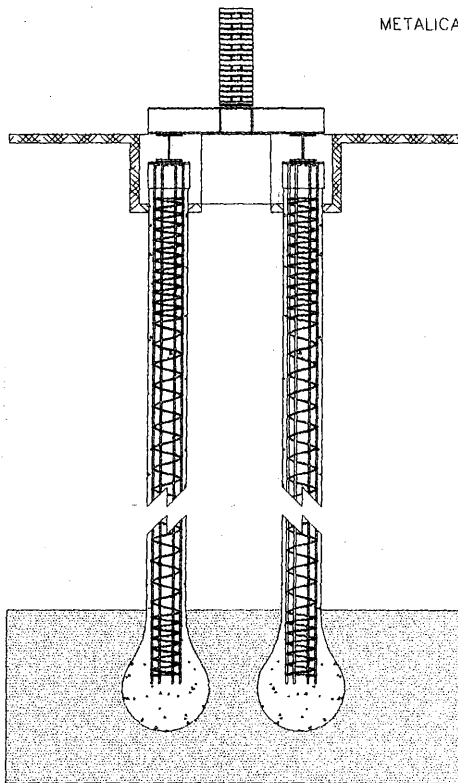


Fig.2.20. Recalce profundo de cimentación superficial mediante pilotes contruidos "in situ" y encepado de viga pasante:
a. Viga pasante de hormigón armado.
b. Viga pasante metálica.

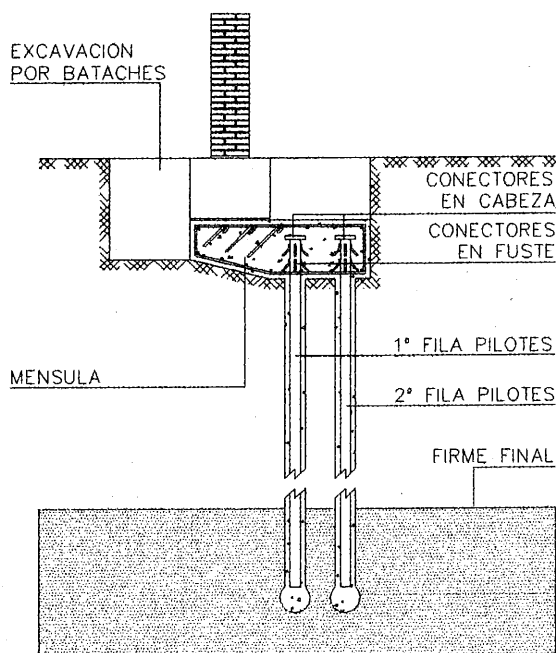


Fig. 2.21. Recalce profundo: pilotes in situ con encepado en ménsula.

la estructura respecto de los pilotes es de gran magnitud y se hace necesario construir una segunda fila de pilotes exterior. Estos últimos son verdaderos pilotes-tirantes, ya que trabajan a tracción compensando el momento de las ménsulas como si de una balanza se tratara.

4.3.2.3. Pilotes hincados

Como ya se ha dicho, para la hincada de pilotes de recalce no deben emplearse nunca mecanismos de vibración o percusión, ya que pueden dañar la cimentación o la estructura del edificio que se pretende reforzar. Por esto, la hincada de pilotes prefabricados debe llevarse a cabo mediante presión.

Existen diversas patentes de pilotes prefabricados hincados a presión, tanto de acero como de hormigón armado: el pilote "Pretest", formado por elementos tubulares de acero, el pilote "Mega", formado por elementos tubulares de hormigón armado, y el pilote "Bjurström", también de acero pero relleno de hormigón una vez hincado. El sistema de ejecución es similar en todos ellos: se trata de un recalce en el que, mediante gatos hidráulicos que trabajan contra el propio elemento que se quiere recalzar, se hincan tramos de pilotes metálicos o de hormigón que se van uniendo hasta formar el pilote definitivo, una

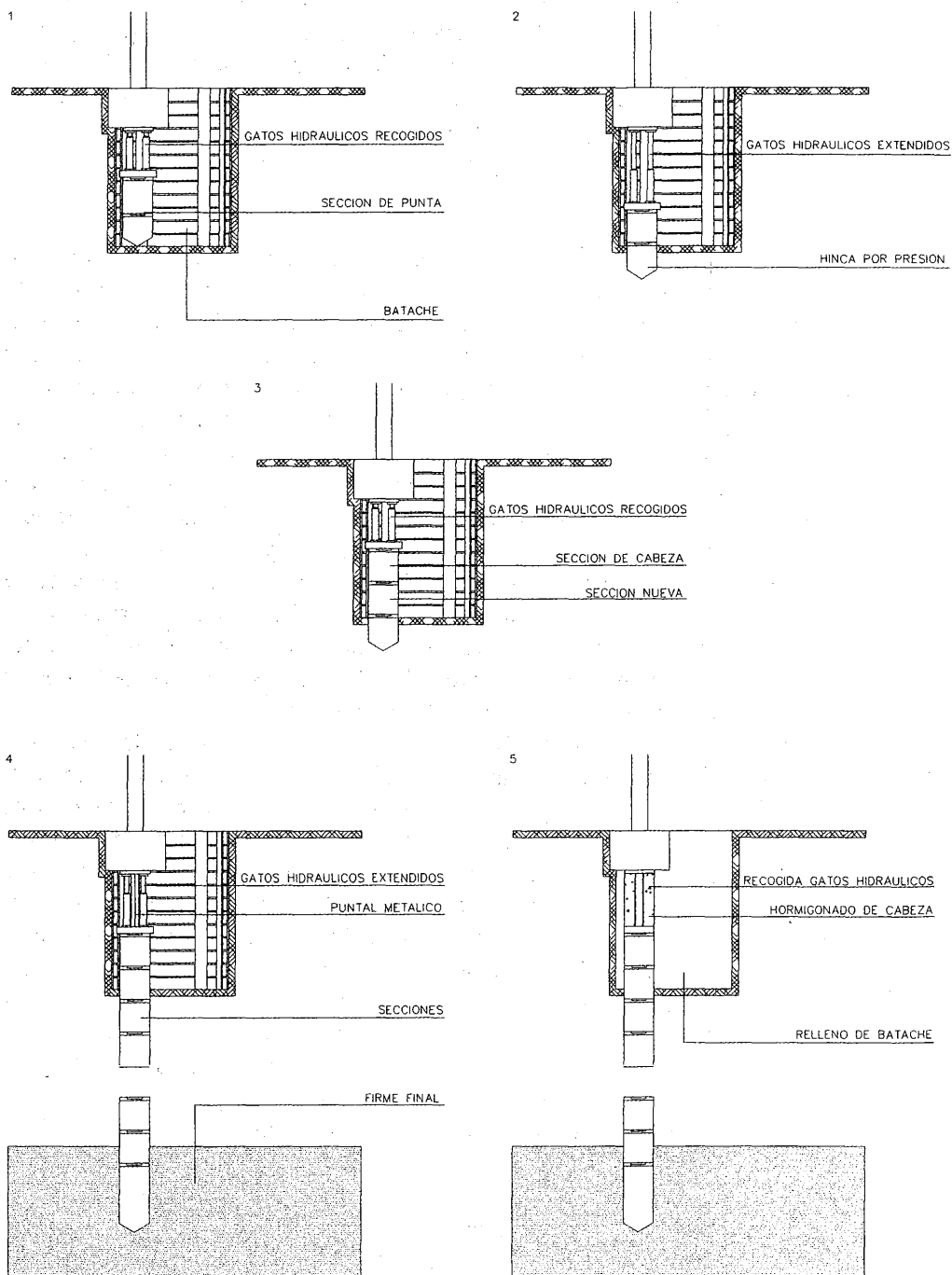


Fig. 2.22. Pilotes hincados tipo PRETEST a presión.

vez alcanzado el rechazo correspondiente.

Se trata de una solución apropiada para terrenos sueltos y con el nivel freático elevado. Su principal ventaja es que el mismo sistema de ejecución garantiza la puesta en carga del recalce con unos asientos despreciables. La operación concluye introduciendo entre el pilote y el elemento recalzado un enano que permita retirar los gatos hidráulicos antes de hormigonar la cabeza del pilote y rellenar el hueco abierto para trabajar.

4.3.2.4. Micropilotes

No son sino pilotes de pequeño diámetro (menor de 300 mm, normalmente entre 100 y 200 mm) que se disponen verticalmente o inclinados, atravesando con un mínimo perjuicio la cimentación antigua, que hace las veces de encepado. Es quizá el sistema de recalce más utilizado por su facilidad de ejecución y por sus resultados. Se puede llevar a cabo con cualquier tipo de cimentación y terreno, eligiendo el sistema de perforación apropiado. La maquinaria empleada para practicar las perforaciones es ligera y de dimensiones suficientemente reducidas como para poder trabajar en un sótano o en un bajo con una altura libre normal, lo cual, en ocasiones, es un condicionante decisivo. No requiere apeo de la estructura ya que el cimientado permanece operativo durante la operación de recalce. La perforación no produce vibraciones excesivas al realizarse por rotación y se pueden alcanzar profundidades de hasta 20 m empalmando vainas (con mayores longitudes no se puede garantizar la continuidad estructural ni la alineación de los micropilotes). En el armado se emplean redondos de acero de alto límite elástico ó armadura de tubo de acero.

La transmisión de cargas queda casi siempre garantizada por la unión por adherencia entre el hormigón nuevo del micropilote y el macizo de cimentación existente. Esta adherencia se puede aumentar si existen problemas de cortante, mediante la aplicación de resinas epoxi en la superficie de contacto entre los dos hormigones. Naturalmente el cimientado debe contar con un estado de conservación adecuado y con un canto y una resistencia suficientes como para soportar los nuevos esfuerzos que introduce el recalce. Caso de no ser así, se puede recurrir a cualquiera de los mecanismos descritos para los recalces con pilotes: ejecución de un encepado continuo, de un encepado discontinuo, de vigas pasantes o vigas-puente o de ménsulas bajo la cimentación. Los diversos sistemas de micropilotes empleados en recalces se distinguen por la manera de llevar a cabo la perforación y el hormigonado:

- **Micropilotes sin entubación:** excavados en seco con barrena helicoidal. Una vez extraída la tierra suelta se introduce la armadura y se inyecta un mortero fluido o una lechada. Esta operación se debe realizar con una tubería auxiliar, hormigonando del fondo a la superficie hasta que el mortero refluya. Si la armadura es tubular será esta misma la que se emplee para hormigonar a través de su interior. Para mejorar la adherencia del micropilote con el terreno y con el macizo de cimen-

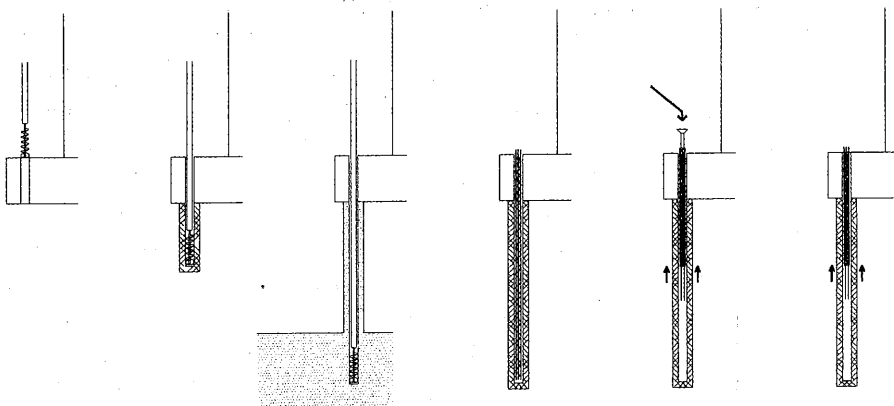


Fig. 2.23. Micropilotes sin entubación.

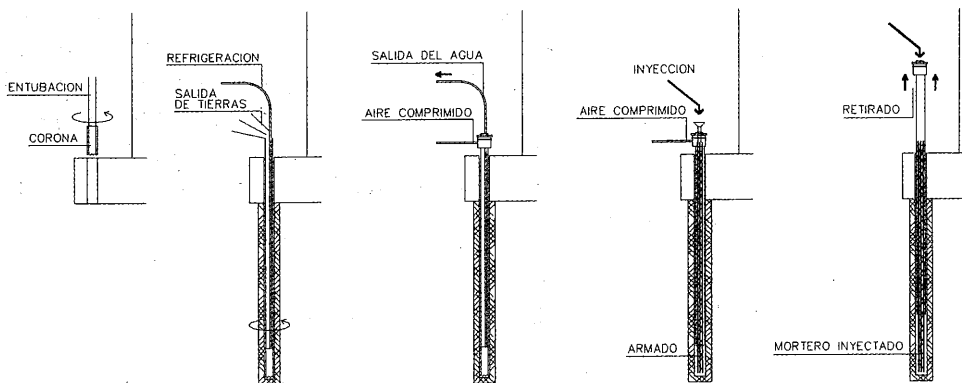


Fig. 2.24. Micropilotes con entubación.

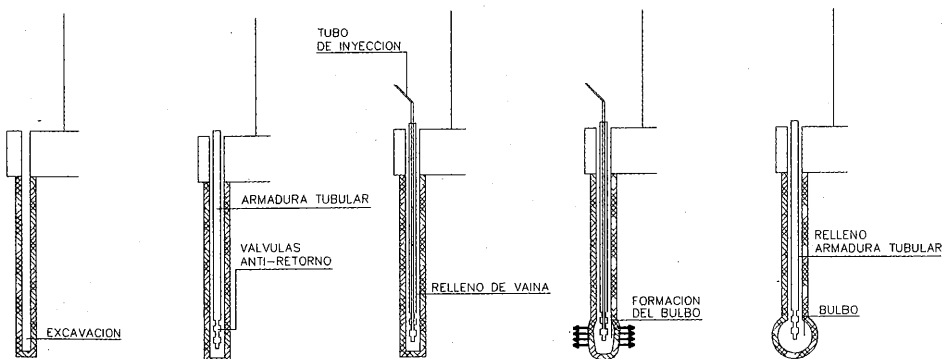


Fig. 2.25. Micropilotes con bulbo inyectado a presión.

tación, se puede taponar la salida, inyectar la lechada a baja presión. Al no entubar la excavación, se trata de una solución apta para suelos no muy flojos y sin nivel freático. El sistema de excavación con barrena helicoidal tampoco permite atravesar bloques o capas cementadas o excesivamente duras.

- **Micropilotes con entubación:** excavados con batería de perforación a rotación que hace las veces de entubación. La tierra suelta se extrae por la presión que provoca el agua que se inyecta para refrigerar la corona de corte. Una vez alcanzada la profundidad deseada y limpiado el taldro del material sobrante, se va retirando la entubación a medida que se inyecta a baja presión el mortero de cemento fluido.

- **Micropilotes con bulbo inyectado a presión:** la excavación se realiza de acuerdo con uno de los dos sistemas anteriores, con entubación o sin ella, según las características del terreno. Lo específico de esta solución es la manera de hormigonar. La armadura utilizada es un tubo de acero provisto de manguitos y válvulas anti-retorno en su parte inferior. En una primera fase se inyecta el mortero o la lechada relleno el hueco entre la armadura tubular y el terreno. En una segunda fase, antes de que la primera lechada haya fraguado completamente, se inyecta el interior del tubo con la suficiente presión como para romper la parte inferior del pilote desplazando el terreno y formando un bulbo.

Este tipo de micropilote es más caro que los anteriores pero a cambio ofrece mucha mayor resistencia.

4.4. RECALCES DE CIMENTACIONES PROFUNDAS

Consisten casi siempre en el recalce de cimentaciones por pilotaje que, por las razones que fueren (ver punto 3: "Determinación de las causas"), han dejado de ser aptas o suficientes para cumplir su función. No hay, como en las cimentaciones superficiales, gran variedad de soluciones para recalzar una cimentación profunda.

Según sean las causas que han provocado la insuficiencia de la cimentación actual, cabe establecer las mismas tres estrategias con que contábamos en los recalces de cimentaciones superficiales: actuando sobre el terreno, reforzando la cimentación existente o sustituyéndola por una nueva. Las dos últimas no se diferencian realmente en el proceso constructivo, ya que ambas requieren la construcción de un nuevo pilotaje alrededor del ya existente. La única diferencia radica en si se considera o no la contribución del pilotaje antiguo a la hora de dimensionar el nuevo. En los casos en los que se decida como garantía no considerar la contribución del pilotaje antiguo, se estaría optando por una sustitución funcional que, en el recalce de cimentaciones profundas, es la única que se lleva a cabo al carecer de utilidad práctica la eliminación de los pilotes enterrados.

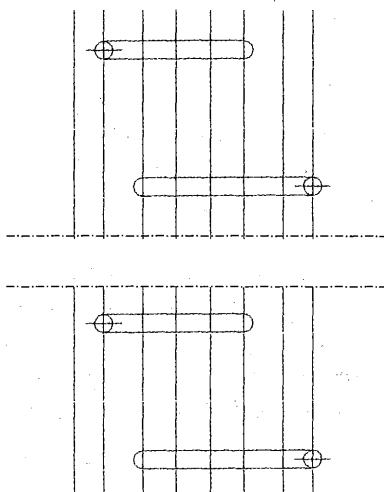
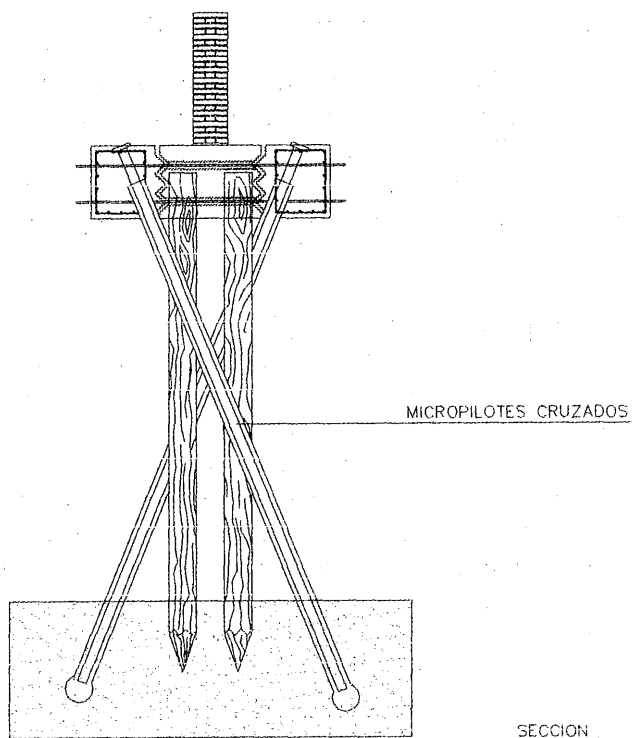


Fig. 2.26 Recalce de una cimentación profunda (realizado con pilotes de madera) mediante un recalce profundo consistente en micropilotes con encepado postensado de hormigón armado.

4.4.1. Actuaciones sobre el terreno

A veces la intervención puede limitarse a la mejora de las características del terreno sobre el que asienta la cimentación existente, sobre todo en casos en los que no existe peligro de colapso y se trata únicamente de reducir o limitar asentamientos. De todas las actuaciones explicadas ya en el apartado 4.2.2. las más empleadas en casos de cimentaciones profundas son las inyecciones y el confinamiento o cosido del terreno.

- **Inyecciones:** de los tres tipos de inyecciones comentados se emplean sobre todo inyecciones de consolidación en la parte baja de los pilotes, para mejorar su resistencia por punta, e inyecciones de compactación a lo largo de toda la longitud de los pilotes, para mejorar su resistencia por fuste. Para llevarlas a cabo se emplean tubos que se hincan en el terreno a través de unos taladros practicados en el encepado.

- **Confinamiento o cosido:** consiste en crear alrededor del pilotaje existente un recinto mediante tablestacas, de manera que se reduce la compresibilidad del terreno en el que descansan los pilotes y se consigue que ambos, pilotes y terreno, trabajen de forma más o menos conjunta formando un gran macizo de cimentación.

El cosido del terreno trata de reproducir un mecanismo semejante al confinamiento, introduciendo pilotes o micropilotes entrecruzados formando igualmente un recinto alrededor del pilotaje existente.

Ambos mecanismos tienen el inconveniente de no poder precisar los asentamientos necesarios para la entrada en carga del sistema, por lo que su utilización en edificios monumentales puede ser arriesgada.

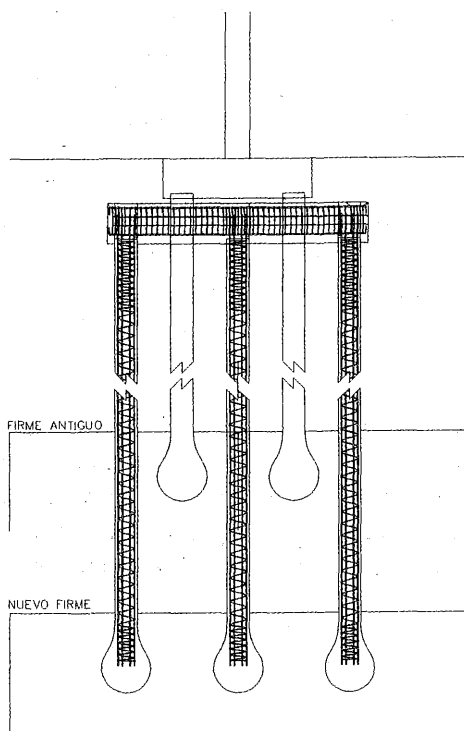
4.4.2. Construcción de nuevos pilotes

El aumento del número de pilotes construyendo otros nuevos, incluso de mayor longitud que los antiguos, es la solución más usual de recalce, salvo que exista limitación por falta del espacio necesario para operar.

Los pilotes nuevos se dispondrán en el perímetro del pilotaje existente, situados de forma simétrica, aunque ello obligue a realizar más pilotes de los estrictamente necesarios, separados entre sí y de los antiguos por la distancia mínima recomendable y serán preferiblemente del mismo tipo que aquellos, excepto si se trata de pilotes hincados, ya que las vibraciones de la hinca pueden provocar daños imprevisibles en el edificio.

La disposición del nuevo encepado debe garantizar la transmisión de cargas para que se produzca una contribución real del recalce. En ocasiones esto se puede con-

NUEVO ENCEPADO BAJO LA CIMENTACIÓN EXISTENTE



EN EL PERIMETRO DE LA CIMENTACIÓN EXISTENTE

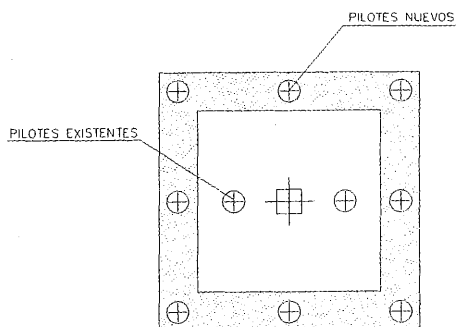
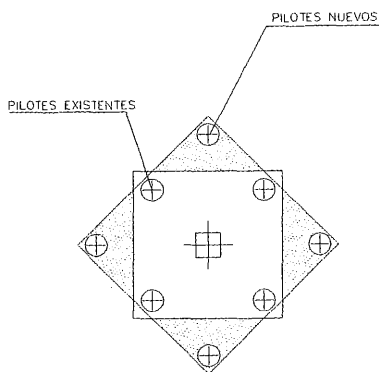
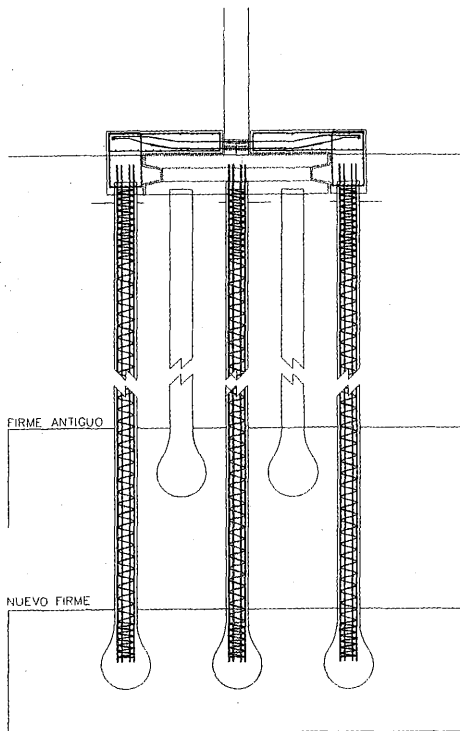


Fig.2.27. Recalce de una cimentación profunda (realizado en pilotes de hormigón armado) mediante un recalce profundo consistente en la ejecución de pilotes de hormigón armado con un nuevo encepado.

seguir creando un anillo periférico que zunche el encepado existente y que garantice la transmisión de cortantes por cualquiera de los mecanismos explicados en el punto 4.3.1.b referido al aumento de la superficie de apoyo de zapatas por sus laterales. Este mecanismo de puesta en carga del recalce no suele ser posible ya que, aunque el encepado existente se encontrara en buenas condiciones de conservación y de capacidad resistente, requisito necesario pero no suficiente, raramente se habrá dimensionado tan sobrado de canto y de armaduras como para admitir el aumento de sollicitaciones que implica la adición de nuevos pilotes. Por ello la mejor solución suele ser la construcción del nuevo encepado por debajo del antiguo englobando en el mismo el pilotaje existente y el de nueva construcción. De esta manera se consigue, al mismo tiempo, aumentar el canto total del encepado con una ejecución sencilla, al no ser necesario, por lo general, apear la estructura para excavar por debajo del encepado antiguo. La puesta en carga del recalce se garantiza rellenando la junta entre los dos encepados con un mortero ligeramente expansivo, pero no es posible conocer con precisión el reparto real de trabajo que se produce entre los dos pilotajes.

En algunos casos también es posible recalzar un pilotaje insuficiente mediante micropilotes que atraviesen el encepado antiguo, de modo muy similar a lo expuesto en el apartado 4.3.2.4, pero no suele ser una solución tan efectiva como en el recalce de cimentaciones superficiales ya que normalmente los micropilotes no pueden, por razones derivadas de su pequeño diámetro, profundizar tanto como los pilotes.

Capítulo 3

OBRAS DE FÁBRICA

1. DEFINICIONES

Podemos definir las obras de fábrica como aquellas constituídas por elementos mampuestos (sillares, ladrillos, adobes, etc) unidos entre sí por argamasa o, simplemente por el propio roce, y basados en la resistencia de todos sus elementos a compresión que, con la ayuda de la trabazón de los mismos entre sí (aparejo) son capaces de soportar las cargas verticales del edificio y, en algunos casos, las horizontales.

Para su estudio tipológico, previo y necesario para entender su patología y las técnicas de intervención, recurrimos, por un lado, a los elementos constructivos que se obtienen y, por otro, a los materiales con que se confeccionan.

Los elementos constructivos son básicamente tres: muros, arcos y bóvedas. Los materiales los podemos agrupar en: tierra, ladrillo y piedra.

1.1. MUROS

Como elementos planos verticales para recibir las cargas de las estructuras horizontales o de las bóvedas y transmitirlas al suelo. Podemos considerarlos como los elementos constructivos de fábrica más elementales que hacen a la vez de estructura y cerramiento de los espacios habitados.

Aparecen en todos los tratados de arquitectura y construcción y se pueden ejecutar con todos los materiales, desde la tapia de tierra o los modernos muros de hormigón armado, hasta todo tipo de mampuestos, desde los ladrillos hasta los sillares. Desde el punto de vista de su técnica constructiva podemos distinguir varias opciones:

- **Simples**, de una sola hoja, de cualquiera de los materiales enunciados, con espesores variables en función del propio material, de la carga a recibir, de su tamaño y de la época en que se ha construido. Los encontramos a lo largo de toda la historia de la construcción.
- **Compuestos**, de varias hojas, normalmente las exteriores de sillería o ladrillo, constituyendo las caras vistas o más resistentes a la interperie, y la central como relleno a modo de hormigón en masa. Es el tipo clásico de “muro romano” que se ha utilizado hasta el siglo pasado.
- **Encofrados** o “de caja”, según Fray Lorenzo de San Nicolás, ejecutados con la ayuda de unos tableros laterales que le dan forma, y constituídos por un relleno interior que adquiere consistencia. Los más antiguos, las tapias de tierra encofradas con los tapias, que podemos considerar de origen hispano según lo que nos ha transmitido Herodoto y

que se han venido utilizando a lo largo de la historia. A continuación aparecieron los de mampostería de canto rodado pequeño, tal como los define Palladio, aunque han tenido poco uso. Por último, aparecen los modernos muros de hormigón y de hormigón armado que recogen la tradición de aquellos.

- **Entramados**, más ligeros, de origen nordeuropeo (celta) que consisten en un entramado de elementos leñosos (pies derechos, durmientes, correas, tornapuntas, etc.) con los senos que quedan entre ellos rellenos de material de fábrica más o menos irregular, desde adobes hasta ladrillos, pasando por relleno de cascotes o yesones. Suelen utilizarse a partir de la planta primera y van combinados con forjados de viguetas de madera y rellenos de bovedillas de distintos materiales. Se han utilizado hasta principios de este siglo.

- **Doblados** o “capuchinos”. Son muros relativamente modernos, desarrollados con fábrica de ladrillo cuando éste sólo tienen una cara vista y necesitamos como aparentes las dos del mismo muro. Podemos considerarlos como una evolución del muro romano del que se mantienen

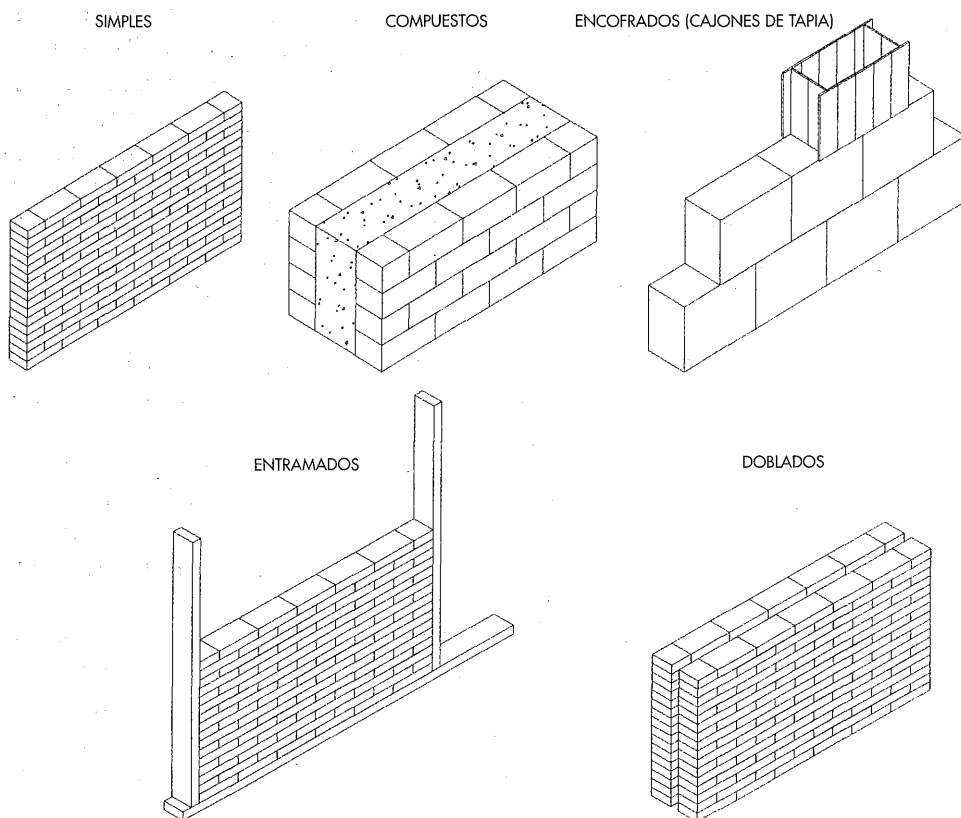


Fig. 3.1. Muros.

sólo las dos caras (“faceras”) y se elimina el relleno interior. Aunque se pueden utilizar como muros resistentes, atando bien las dos hojas, han tenido un uso fundamentalmente de fachada y cerramiento y entre ellos cabe destacar el “cavity wall” británico de la Revolución Industrial.

1.2. ARCOS

Podemos considerar dos tipos de arcos relacionados con las obras de fábrica. Aquellos que forman parte del propio muro y tienen por objeto aligerarlo o poder abrir huecos en él, y aquellos otros que podríamos llamar propiamente estructurales, para cubrir vanos, formar bóvedas, conectar pilastras, etc. En ambos casos, las formas y trazados van adecuándose al estilo de la época, aunque también a la función constructiva, y su solución técnica se basa en la yuxtaposición de dovelas que persiguen la transmisión preferente de esfuerzos de compresión, por lo que resulta fundamental el preciso acoplamiento entre piezas, bien directamente, bien por intermedio de algún tipo de mortero, como es el caso de los de ladrillo. Aunque se pueden encontrar algunos indicios previos, en realidad fueron los romanos quienes lo usaron masivamente en sus construcciones.

- **Arcos aligerantes**, incluidos en los muros y de su mismo espesor. Pueden llegar a ser muy rebajados, hasta convertirse en “arcos adintelados” o “dinteles adovelados”. En los muros de ladrillo aparecen también los “arcos de correa” hechos con las mismas hiladas que adquieren la curvatura suficiente. También podemos considerar aquí aquellos arcos decorativos que afectan a parte del espesor del muro y, por tanto, también aligerantes. Aunque lo más corriente es que sean de un sólo vano, repitiéndose en cada hueco, también cabe considerar los geminados y múltiples, que permiten abrir un hueco de más luz mediante arcos repetidos apoyados en columnas o parteluces intermedios. Asimismo se puede incluir los “arcos de descarga”, realizados algunas hiladas por encima de los huecos, para llevar las cargas a los machones.

- **Arcos estructurales**, con una función constructiva de soporte y transmisión de cargas. Consideramos en este caso tres tipos de arcos:
 - Arcos que cubren la luz entre pilastras o columnas. Son la alternativa al dintel en estructuras porticadas y resulta característico de la arquitectura occidental a partir del Imperio Romano.
 - Arcos de refuerzo de bóvedas y cúpulas. Es una técnica introducida por los romanos (bóveda romana) y resultan muy aparentes en aquellas construcciones, como es el caso del Panteón de Agripa.
 - Arcos de contrarresto, caso típico de los arbotantes, que permiten sujetar empujes laterales producidos por bóvedas u otros arcos sin necesidad de recurrir a pesados muros.

1.3. BÓVEDAS Y CÚPULAS

Son la consecuencia directa de tener que cubrir grandes superficies con la misma técnica del arco, es decir, aprovechando la capacidad de resistencia a compresión de los materiales pétreos, gracias a su forma y disposición relativa. Su origen básico para la construcción occidental está también en la arquitectura romana donde aparece primero la bóveda romana propiamente dicha, a base de arcos paralelos transversales, básicamente de ladrillo, unidos entre sí por elementos longitudinales que constituían un entramado abovedado que se rellenaba posteriormente de hormigón.

La solución para la cúpula era similar, mediante arcos radiales (meridianos) y refuerzos paralelos (cúpula del Panteón, fig.3.6). Más adelante, el Imperio Bizantino desarrolla la bóveda continua de una sola hoja de ladrillo a sardinel, lo mismo las de cañón que las de arista o de rincón de claustro, así como las cúpulas esféricas (fig. 3.5) hasta su máxima expresión en Santa Sofía de Constantinopla.

Las bóvedas y cúpulas son una constante en toda la arquitectura posterior a la romana hasta nuestros días, con varias etapas importantes con adelantos técnicos que mejoran su ligereza y permiten, por tanto, aumentar su luz. Así, el Románico ofrece solidez y pesadez con la piedra, el Gótico aporta ligereza con refuerzos y plementerías y por fin el Renacimiento (Brunelleschi) incorpora la cúpula de dos hojas que, además de ligereza, permite un buen funcionamiento higrotérmico, tanto ante la lluvia exterior como ante el vapor de agua interior.

El último paso lo tenemos en nuestro país con el desarrollo de las bóvedas tabicadas, sobre todo de rasilla cerámica, muy corrientes en la segunda mitad del siglo XIX a partir de la Revolución Industrial, gracias a la producción seriada de rasillas (fig. 3.7) muy ligeras y típicas de la zona catalana. También en nuestro país son de destacar en los últimos siglos las bóvedas extremeñas, similares a las catalanas y con una interesante técnica de ejecución, y las mallorquinas y catalanas de arista, de piedra.

En cualquier caso, las bóvedas y cúpulas constituyen una solución importante en la arquitectura occidental, definitoria de las siluetas de la mayoría de sus edificios.

1.4. LA CONSTRUCCIÓN CON TIERRA

Vistos los elementos constructivos más usuales, conviene recordar también los materiales utilizados para ejecutarlos. Empecemos por uno de los más primitivos: la tierra.

La tierra nos recuerda la naturaleza, pero también la construcción directa, la cons-

trucción y la arquitectura popular y, en cierto modo, la “construcción pobre” o, incluso, la “construcción de pobres”.

Es cierto que los monumentos que recordamos en su mayoría están contruidos con piedra, preferentemente de sillería, pero no es menos cierto que muchos de los edificios también monumentales que todavía perduran están contruidos con tierra en alguno de sus elementos; pero, sobre todo, la tierra es un material de gran tradición popular como lo prueba su presencia en un sinnúmero de edificaciones rurales a lo largo y ancho de nuestro planeta, con especial incidencia en nuestra península. De hecho, Plinio (siglo I-II) en su Historia Natural dice que “en Hispania se veían torres y atalayas hechas de tierras, de remotísima antigüedad”. Y ello es lógico, toda vez que la construcción con tierra es tan antigua como la propia humanidad y lo prueba el hecho de que las técnicas de ese tipo de construcción están presentes en la mayoría de los tratados de arquitectura y construcción que han llegado hasta nuestros días, desde el “eterno” Vitrubio. No obstante, hay que reconocer que en la mayoría de dichos tratados las técnicas constructivas con tierra no ocupan un lugar preminente e, incluso, se confunden. Veamos las más destacadas.

1.4.1. Breve análisis histórico de los sistemas constructivos con tierra

Plinio, en su Historia Natural, escribe: *“¿no hay en Africa e Hispania paredes de barro, a las que llaman “de molde”, porque se levantan, más que construyéndolas, vaciándolas entre dos tablas, las cuales paredes duran siglos por ser inmunes a la lluvia, al viento, al fuego, siendo más fuertes que cualquier cemento?. En Hispania aún están a la vista las atalayas de Hannibal y las torres de barro alzadas en lo alto de las montañas”*.

Vitrubio habla, sobre todo, de la construcción con entramados, adobes y revocos. A partir del siglo XV, en que se recupera el Vitrubio, la mayoría de tratados se basan en él, por lo que no es extraño que repitan parte de sus enseñanzas, no obstante aportan algunos datos nuevos y, concretamente, los relativos a la construcción con tapial que aquel no había incluido en su libro. Así Palladio, en su libro I, capítulo IX, al describir *“las maneras de los muros”* incluye la de los que denomina *“muros hechos á caxa”*.

Durante la Edad Media, nos han quedado numerosas referencias árabes que también nos hablan de la construcción con tierra. Así, Ibn Jaldun (siglo XIV) explica la pared de tierra de la siguiente manera en su libro “Los Prolegómenos”: *“Otra rama es formar las paredes con sola arcilla. Se sirve para esta operación de dos tablas, cuya longitud y anchura varían según los usos locales; pero sus dimensiones son, en general, de cuatro varas por dos. Se colocan estas tablas en los cimientos, observando el espacio que debe separar entre ambas, conforme a la anchura*

que el arquitecto ha juzgado conveniente dar a dichos cimientos (...) y se vierte allí una mezcla de tierra y cal que se apisona en seguida con pisones hechos a propósito para este fin”.

En el siglo XVI Fray Lorenzo de San Nicolás vuelve a incorporar las construcciones de tierra en su “Arte y uso de la Arquitectura”. Distingue entre el muro apisonado de piedra y cal (el de Palladio) del tapial propiamente dicho: “...y el quinto, y el más fuerte de todos, es de tierra (...) y por esta causa algunos Antiguos edificaron muros con las partes exteriores de piedra, y las interiores de tierra”. Fray Lorenzo introduce, además, los tapiales reforzados con machones de ladrillo o de mampostería y verdugadas: “...o de pilares de ladrillo y encima de cada altura se echan dos hilados de ladrillo, que comunmente llaman verdugos, y estos hacen más fuerte la obra (...), también pueden entre estos pilares echar tapias de tierra”.

Más cerca de nosotros, el tratado de D. Benito Bails, a finales del siglo XVIII, vuelve a hablarnos de tierra. Primero de los adobes, marcando la diferencia con el ladrillo: “Esta piedra artificial puede gastarse cruda o cocida; a la que se gasta cruda, la llamamos adobe, quedando solo para la cocida el nombre de ladrillo. (...) La autoridad de los antiguos está a favor de las paredes de adobes, porque siempre que Vitrubio habla de paredes de ladrillo, entiende de los crudos; y si acaso no han subsistido hasta el día de hoy los edificios antiguos, hechos de adobe, es porque en el discurso de tantos siglos, se han arruinado los guarnecidos o revocos; y expuesto el barro crudo a las lluvias y aguavientos, se ha ido desmoronando poco a poco”.

Pero quizás el tratado que habla de las construcciones de tierra con más detalle sea el “Arte de albañilería” de Juan de Villanueva, escrito a principios del siglo XIX. Villanueva describe con profusión las obras de tapia, la composición de los tapiales, el proceso de ejecución y sus variantes. Asimismo habla del adobe, sus tamaños, la manipulación de las tierras y el proceso de moldeado y secado. Por último, describe también los revocos, dando dosificaciones y procedimientos de aplicación.

En el caso de la tierra, no obstante, es importante considerar las técnicas constructivas en si mismas; técnicas que tienen un profundo arraigo en la naturaleza, con materiales extraídos directamente a pie de obra y que encajan perfectamente en el entorno, técnicas que han permanecido a lo largo de los siglos a pesar de su escasa consideración y que están en la base de técnicas actuales como el ladrillo, el hormigón, incluso armado, los encofrados rampantes, etc., técnicas, en fin, que están llamando todavía a las puertas de la arquitectura en los umbrales del siglo XXI y que se nos ofrecen como posibilidad de un tipo de construcción eterno que mantiene los valores básicos del “arte técnico” de la construcción.

1.4.2. Tipología de las construcciones con tierra

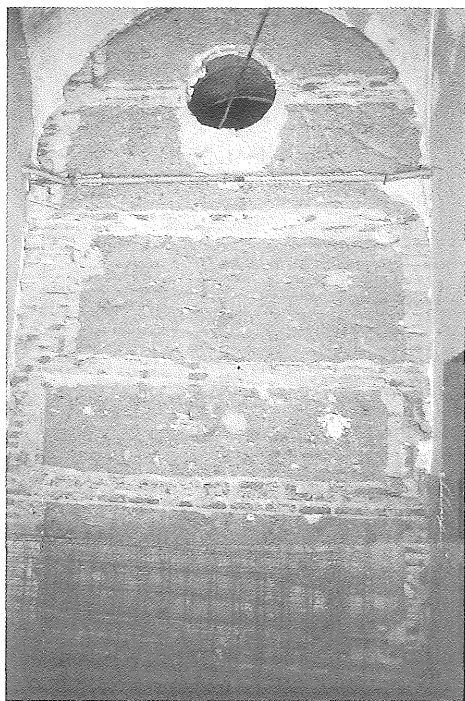
A) Tapia-tapial

Debemos considerar los dos términos juntos pues muchas veces se confunden y, de hecho, en algunos casos tienen el mismo significado.

Tapia

Según la enciclopedia ESPASA, *“pared de tierra que se construye en el campo para las edificaciones y cerramientos de patios y porciones de terreno en los países en que escasea la piedra”*.

Al profundizar algo en su descripción, especifica los tipos de tierra y la época del año adecuados: *“La tierra destinada a hacer las tapias debe estar limpia de raíces, paja y sustancias extrañas, porque impiden la unión de las partículas terrosas, y después, al pudrirse, dejan sus espacios vacíos, quebrantándose las paredes y facilitándose su desmoronamiento.”* *“Las tapias de tierra deben construirse en la primavera, porque en ésta época del año entran los calores y las secan lentamente, que es lo que conviene. Los calores del estío, que las secan con prontitud, producen grietas; el otoño no es favorable a causa de las lluvias, y menos el invierno, si el país está bajo la influencia de las heladas”*.



3.1. Muro de tapia con verdugadas de ladrillo.



3.2. Muro de tapia con machones y verdugadas de hormigón pobre.

Distingue, asimismo, tres tipos de tapias que encontraremos en casi todos los tratados.

“...Tapia ordinaria, cuando se emplea la tierra sola”

“...Tapia real, la formada por capas de tierra con la proporción de un 10% de cal apagada en polvo, y se mezcla al humedecerla para ponerla en estado de usarla...”

“...Tapia acerada, la guarnecida en sus dos paramentos con mezcla de cal y arena”.

Este último tipo recibe también el nombre de calicostrada o calicastrada en algunos sitios, aunque en otros la tapia calicastrada es la que se hace con tongadas pequeñas con intercalación de lechadas de cal a modo de verdugadas. De hecho, en la acerada, la capa de cal que cubre los lados tiene continuidad en una tongada horizontal.

Fernando García Salinero, en su *“Léxico de alarifes de los siglos de oro”*, incluye además la “tapia valenciana”, tomada de Fray Lorenzo de San Nicolás, de la que dice:... *“Se hacen con tierra, medios ladrillos y cal, echando lechos de uno y otro, es obra fortísima...”*.

Por otra parte, sigue el ESPASA, *“Una variante del tapial ordinario es el tapial de barro mezclado con paja, el cual consiste en una pasta compuesta de tierra franca humedecida mezclada con heno o paja triturada, la que impide la formación de grietas estableciendo cierta trabazón en la masa”*.

Asimismo, como pared en su conjunto, cabe distinguir dos variantes básicas, según nos enseña Villanueva: *“Son las paredes hechas de tierra solamente, o enlazadas con algún otro material”* y más adelante *“con la tierra se construye tapias, que unas veces constan únicamente de cuerpos regulares, hechos con ella sola, dentro de unos cajones o formas dispuestas a este fin, y otras de los mismos cuerpos interpolados y trabados con machos o pilares de otras materias más consistentes”*.

Por último, con respecto a la propia tierra amasada y apisonada, existen numerosas versiones sobre su composición ideal. No es fácil establecer un único tipo de mezcla pero podríamos indicar como tipo de tierra más adecuada la que nos da Juan de Villanueva: *“La tierra que debe emplearse para construir tapias o paredes debe ser arcillosa, pegajosa, compacta, limpia de grijo, y con poca mezcla de arena y cascajo”*. Esto podríamos traducirlo a los siguientes porcentajes facilitados por Jorge de Olarte.

Arcilla	de 15% a 20%
Limo	de 10% a 25%
Arena	de 50% a 70%
Mat. orgánica	inferior al 2%

Tapial

Recurrimos de nuevo a la enciclopedia ESPASA que nos dice: *“Conjunto de dos tableros que, sujetos con los costales y las agujas, se colocan verticales y paralelos para formar el molde en que se hacen las tapias”*.

La diferencia con la tapia está bastante clara. Sin embargo, al hablar de construcción *“la acepción de esta palabra es sinónima de tapia, desde el punto de vista constructivo. La ventaja de su denominación estriba en que tapia puede confundirse con pared de cerca; en cambio, la modulación tapial se refiere exclusivamente a la construcción de los muros fabricados con mortero de tierra. Ordinariamente, el molde de madera o encofrado necesario para esta construcción se le llama también tapial”*

Refirámonos, pues, ahora al tapial como *“encofrado de la tapia”*: la misma enciclopedia los describe: *“Las dos paredes de estos cajones están formadas por unas tablas de madera resinosa con preferencia, de 2 a 4 cm. de grueso y unidas por medio de unos travesaños de manera que alcancen una altura de unos 70 u 80 cm. En los travesaños verticales que mantienen unido el entablonado hay unas muescas dispuestas para recibir dos series de traviesas que mantienen separadas las dos tablas a la distancia que convenga, según sea el espesor del muro”*.

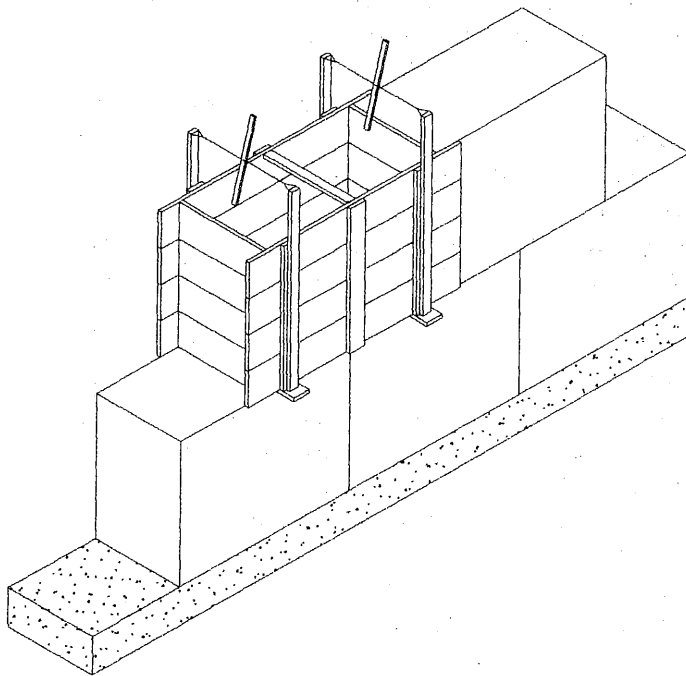


Fig. 3.2. Tapial.

En definitiva, tapia y tapial son dos términos complementarios de una técnica constructiva que permite la ejecución de muros de cerramiento o de carga mediante el uso de unos encofrados laterales desplazables (tapiales) que permiten contener temporalmente y dar forma a un material preparado "*in situ*" a partir de una materia prima fácilmente asequible que, una vez mezclado y apisonado, adquiere la forma y consistencia definitivas (tapia) y que nos permite establecer esta técnica como origen de la actual de muros de hormigón encofrados, y de los encofrados rampantes.

B) Adobe

Recurrimos también al ESPASA: "*Ladrillo o cuerpo formado con tierra arcillosa, a veces mezclada con paja, arena, estiércol, etc... para darle consistencia, y secado al sol*".

Es, quizás, el elemento más conocido de la "*arquitectura de tierra*" o "*arquitectura de barro*" y, probablemente, el más universal y el que nos encontramos en todas las zonas geográficas y todas las épocas. Aparece ya en el libro del Exodo al castigar el Faraón al pueblo israelita a que fueran ellos a buscar la paja para los adobes.

Se podría pensar que se trata de un segundo paso en la evolución de las técnicas constructivas de tierra después del tapial, ya que en la imitación de la naturaleza primero se buscaría la obra monolítica y después, por facilitar el trabajo, la pieza (mampuesto) prefabricada. No obstante, no conocemos datos históricos concretos en este sentido. Sin embargo, sí es evidente que su presencia es más universal e incluso los tratadistas más antiguos lo incluyen entre las técnicas normales de construcción como un tipo más de ladrillo, en este caso no cocido al fuego sino simplemente secado al sol ("*later crudus*" según Vitrubio).

Juan de Villanueva explica con detenimiento el amasado de la tierra y su composición atendiendo, además, a la economía del proceso. Por ello advierte al principio que "*todas las tierras, exceptuadas aquellas que sean demasiado arenosas, pueden ser empleadas para este género de construcción; sin embargo aquellas que contienen una fuerte proporción de arcilla son preferibles*".

En definitiva, se trata de un mampuesto paralelepípedo con el que se pueden construir fábricas aparejadas para mayor trabazón y resistencia. Se suele usar para su unión mortero de barro o, incluso, de cal, a sabiendas que el paso del tiempo y la lluvia facilitarán la unión de las piezas entre sí y, por tanto, aumentarán la solidez del conjunto.



3.3. Muros de adobe.

La mezcla de tierra exige una buena parte de arcilla para su fácil moldeo, y la ayuda de paja de cualquier tipo que, además de trabar la propia mezcla y facilitar su moldeo, le aporta una ligereza necesaria para su manipulación. Esta mezcla se coloca en “*gradillas*” para moldearla y al alcanzar cierta dureza se sacan y se exponen al sol. La pared resultante tiene una superficie poco compacta que necesita protección frente a los agentes atmosféricos (lluvia y helada).

C) Entramados

Entendemos por entramado la técnica de ejecución de paños superficiales para paredes a base de un entrelazado de elementos lineales leñosos y un relleno de tierra. En esta definición caben varios tipos de soluciones constructivas de las que podemos destacar las siguientes:

- El **encestado**, a base de una malla de varillas leñosas que recuerdan la de una cesta y que actúan de soporte del barro que se le aplica por ambas caras para obtener un elemento superficial de cerramiento vertical. Pueden considerarse como un claro reflejo de soluciones naturales como las de los nidos de las aves, y se trata de tabiques como unidad más corriente en toda Europa, o de chimeneas como la de la “*casa pinariega*” de las tierras sorianas. Resultan unos elementos muy ligeros y algo resistentes a la tracción. Puede considerarse una de las técnicas más antiguas de construcción y ya Vitrubio la mencionaba en su obra.

- El **bahareque**, a base de un entrelazado de cañas abiertas (quincha) al que también se aplica barro por ambas caras. Es ésta una técnica muy corriente en países tropicales americanos, incluso hoy en día y, sin duda, una de las más recuperables en esas zonas.

Tanto ésta como la anterior pueden considerarse como claros precedentes del hormigón armado.

- **Pared entramada**, a base de un entramado de pies derechos y carreras de madera que constituyen el “*alma*” de la pared y cuyos huecos (senos) se rellenan normalmente de fábrica de adobe. Supone una técnica constructiva que ha perdurado durante muchos siglos, adaptándose a zonas y materiales. De hecho la madera es un espléndido complemento de la tierra, que le da resistencia mecánica y ligereza. En este sentido Alonso Ponga nos dice “...sobre todo en los muros exteriores de los pisos superiores, o en los tabiques internos de separación. En la Tierra de Campos son muy sencillos, normalmente unos simples rollizos apenas sin escuadrar colocados verticalmente sobre el muro, desde el piso bajo hasta el tejado, a veces entre uno y otro de estos rollizos se coloca algún madero en diagonal, pero nunca los entramados de esta zona llegan a la complicación y a la vez a la elegancia de los de otras zonas, como las Riberas del Duero de Aranda, Peñafiel, San Esteban de Gormaz, Almazán..., donde abundan los entramados en forma de aspa, de estrella, etc.”

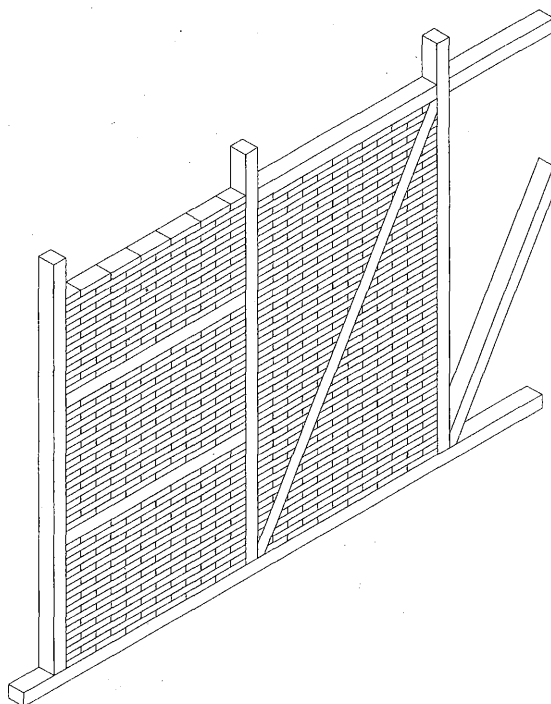


Fig. 3.3. Entramado.



3.4. Desprendimiento del revoco de protección de un muro entramado con rellenos de adobe.

D) Revocos

Se trata, sin duda, de una técnica complementaria a cualquiera de las tres anteriores y supone una capa de acabado superficial hecha en base a mortero de barro y algún aditivo endurecedor (normalmente, cal) además de los plastificantes (antiguamente estiércol) para darle más durabilidad ante acciones físicas y mecánicas.

Encontramos una descripción interesante en la Revista General de Arquitectura y de los Trabajos Públicos de 1984. En ella, al hablar de revocos nos indica: *“Para el revoco interior y los techos de las casas, se puede emplear el mismo mortero; pero entonces se mezclan los cascabillos del cereal, o el cagajón del caballo o del cordero, o boñiga de vaca, también estiércol y abono de mantillo, pero en pequeñas cantidades. Ellos sirven para dar cohesión a la composición. Si la tierra empleada es muy arcillosa, hay que mezclar tierra arenosa o arena. Las experiencias locales indican pronto las proporciones. Los revocos y los techos así hechos son asimismo bellos y más sólidos que los hechos con cal y yeso. Se pueden hacer muy delgados”*.

En definitiva, supone una técnica de acabado superficial necesaria en todas las obras de tierra (tapias, adobes y entramados) que ha sufrido una importante evolución, a la que se pueden incorporar, quizás, productos más actuales y que, en cualquier caso, requiere un profundo estudio con vistas a la recuperación del patrimonio construido con tierra, pues estamos ante el material más externo y, por tanto, el más atacable por el paso del tiempo y, en consecuencia, el que más necesita de reparación y mantenimiento.

1.5. LA CONSTRUCCIÓN CON LADRILLO

No parece haber duda en que el ladrillo es uno de los materiales básicos de la construcción y, por ende, de la arquitectura a lo largo de la historia, sobre todo en los países mediterráneos. De hecho, la aparición del ladrillo parece ser una consecuencia clara de la necesidad de sustituir a la piedra en los países donde ésta no abunda y, sin embargo, sí lo hace el barro. En este sentido podríamos considerar al adobe como un antecedente directo, aunque simultáneo, del ladrillo. Según nos recuerda el ESPASA, *“Desde la más remota antigüedad se conoce el uso de dos clases de ladrillo: el formado por la pasta de arcilla con más o menos mezcla de arena y de paja machacada, secado simplemente al sol, ó el cocido al fuego”*.

Considerado así, el ladrillo sería un material de segundo orden, no obstante cabe destacar el hecho de que el ladrillo, al ser más pequeño (más manejable) y con posibilidad de recibir una forma adecuada en su fabricación, se convierte desde el principio en un material más “ágil”, con más “flexibilidad” en su utilización y colocación relativa, por lo que desarrolla desde muy pronto una técnica constructiva propia que, a lo largo de la historia, produce lo que podríamos llamar una “arquitectura del ladrillo”.

Aunque sus orígenes más remotos los podemos encontrar en la zona de Caldea, sin embargo la construcción de ladrillo que ha influido en la técnica constructiva y en la arquitectura occidental y, por tanto, la que más nos interesa, parte de los Romanos. No obstante, éstos utilizaron el ladrillo principalmente como un “material constructivo” más que como un “material arquitectónico”, en el sentido que la arquitectura romana tiende a utilizarlo como material para construir, es decir, para consolidar muros, para realizar la estructura de arcos y bóvedas, etc. pero no para “enseñar” pues se recubrían con otros materiales más nobles. Hay que esperar hasta la llegada de los árabes y su dominio cultural en la Península Ibérica, para que cobre importancia la imagen del ladrillo visto como elemento constructivo y arquitectónico a la vez, ¿quizás por transmisión de una cultura asiática a través del Norte de Africa?. En cualquier caso el uso del ladrillo como elemento visto ha tenido sus altibajos, tanto en España como en Europa y, en general, ha dominado el concepto de “material de segundo orden”, detrás de la piedra, como se puede comprobar directamente con el patrimonio arquitectónico que la historia nos ha ido legando.

En cualquier caso, encontramos ladrillos en prácticamente todos los elementos constructivos básicos, es decir, en cimentaciones, en paredes y muros exteriores e interiores, en tabiques, en arcos y en bóvedas. La razón sea, probablemente, esa flexibilidad de la que se hablaba más arriba que permite usarlo como “mampuesto” de pequeño tamaño unido con morteros de agarre construyendo cualquier

forma y adaptándose a las necesidades de cada caso. Unicamente se hace necesario que trabaje a compresión y que su “aparejo” permita suficiente trabazón para que se mantenga la integridad del elemento constructivo sometido a cargas.

1.5.1. Breve recorrido histórico desde Roma hasta nuestros días

A) El ladrillo en la construcción romana

En el Vitrubio aparece la descripción del “*latere*” y de las obras que con él se construyen. El “*latere*” de Vitrubio puede ser tanto de barro crudo como de barro cocido y nos recuerda sus condiciones de fabricación.

Quizás por su origen, el mundo romano nunca quiso hacer de tan “humilde” material una arquitectura propia y siempre lo dejó oculto bajo revestimiento de estucos o de piedras. No obstante, y dada su utilidad, desarrolló una producción industrializada y, por tanto, normalizada de medidas.

En cuanto a los elementos constructivos que los romanos ejecutaban con ladrillos destacan los muros y los arcos y bóvedas.

Los muros, “*opus latericium*” se resolvían normalmente como fábricas mixtas de ladrillo cocido en sus caras y mortero en su interior. Así nos aparece el “*opus testaceum*”. También se utilizó un muro sólo de ladrillo con un aparejo en espiga que, sin embargo, no da una traba horizontal muy clara. Se trata del “*opus spicatum*”.

En cuanto a los arcos y bóvedas, también los romanos desarrollaron unas técnicas específicas en donde el ladrillo era protagonista principal. En los arcos parece que no hay duda de su construcción utilizando los ladrillos

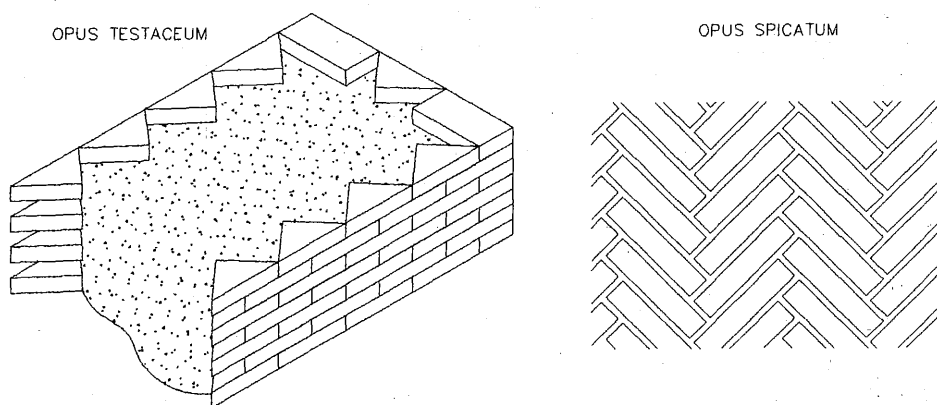


Fig. 3.4. Opus latericium.

como dovelas de poco espesor para hacerlos estables, aunque después los recubriesen de piedra o de estucos. Pero es en la bóveda donde los romanos introdujeron el uso de los ladrillos con una técnica más novedosa, partiendo de la bóveda de cañón tal como nos la describe Francisco Ortega: *“Pero la construcción más ingeniosa y elegante del cañón circular romano tiene lugar mediante arcos de ladrillos, enlazados entre sí por medio de ladrillos transversales, en el sentido de la generatriz de la bóveda, de manera que se constituían cajones cerámicos, que más tarde, con la capa de hormigón de trasdosado, quedarían rellenos de este último material”*. *“La bóveda así concrecionada se mostraba como una unidad totalmente monolítica y permitía, por su cara inferior, la creación de casetones decorativos”*.

La conjunción de arcos y bóvedas permitió la construcción del Panteón de Agripa, primera gran cúpula que nos ha legado la arquitectura, donde la técnica del ladrillo permitió aligerar muros de contrafuerte y obtener una cubierta esférica de más de 40 m. de diámetro que todavía permanece. Y quizás para emular y superar la cúpula del Panteón, manda construir Constantino la bóveda de Santa Sofía que se basa en el aligeramiento de sus elementos componentes, y ese aligeramiento sólo se consigue en base al ladrillo. Como nos recuerda de nuevo Ortega, *“la bóveda bizantina es la bóveda desmaterializada, entendiendo esto como la bóveda construída con una sólo hoja de ladrillos sin trasdosado de hormigón y, sólo en ocasiones, con un relleno de tierra y con elementos cerámicos de aligeramiento; y por tanto, mucho más ligera, atérmica y flexible que la bóveda romana”*. Ahora, ya no se mezclan los arcos de ladrillo con el “opus cementium” romano, sino que se hace trabajar al ladrillo como material único con su mortero de agarre lo que, aunque no consiga luces más gran-

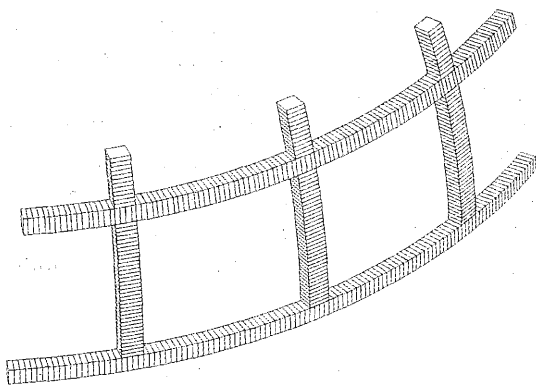


Fig. 3.5. Nervios y anillos del Panteón.

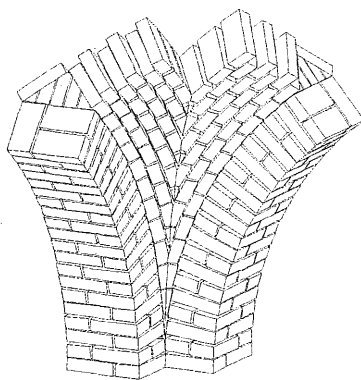


Fig. 3.6. Bóveda bizantina.

des, sí obtiene mayor ligereza en el conjunto.

Lógicamente, también en España construyeron los romanos obras de ladrillo de las que cabe destacar el Acueducto de los Milagros en Mérida, el anfiteatro de Itálica y el templo de Vich, entre otros.

B) El ladrillo en el Medioevo

Durante este largo periodo histórico la construcción con ladrillo en Europa sufre diversas vicisitudes dependiendo de las zonas, aunque con poca evolución de su uso si exceptuamos nuestra península, donde, gracias a la dominación cultural de los árabes, tuvo un desarrollo especial y marcó un importante foco de influencia para construcciones posteriores en el resto de Europa.

Los musulmanes, que heredaron por razones geográficas las artes de la Asiria, de la Caldea y de la Persia, fueron los propagadores de las arquitecturas de ladrillo por todos los países que conquistaron. Y fieles al sentido de aquellas tradiciones, supieron dar valor de arte a las obras de ladrillo, dejándolo visible y tratándolo según su naturaleza, de lo que salieron las lacerías, las espinas de pez, las ménsulas escalonadas, las combinaciones geométricas y todos los ornatos que dan carácter a la ornamentación mahometana.

En cuanto a la Península Ibérica, la riqueza y evolución de las construcciones en ladrillo de origen árabe son muy importantes naciendo el estilo mudéjar y llegando incluso hasta el siglo XV.

C) El ladrillo en el Renacimiento

Con la evolución alcanzada en el periodo anterior se puede considerar que la presencia del ladrillo en la Arquitectura de esta nueva época sufre un retroceso, probablemente por diversas causas de las que cabe destacar las más importantes.

- La vuelta al mundo romano en la Arquitectura hace que se considere de nuevo al ladrillo como un material de segundo orden para ser revestido, bien con elementos pétreos bien con estucos y revocos.
- En España, la necesidad de decoración superficial detallista (el Plateresco) hace que se utilice con preferencia la piedra, más fácil de trabajar que el ladrillo para ese tipo de decoración. Aunque la arquitectura mudéjar alcanza un grado importante de dibujo de fachada, sin embargo se trata siempre de juegos geométricos que ahora se abandonan.

No obstante el ladrillo sigue utilizándose como elemento constructivo; no en balde es la época donde se descubre el tratado de Vitruvio y se escriben

los primeros tratados propios en toda Europa, y en ellos se habla de los muros de ladrillo. En España, la influencia mudéjar es muy grande y siguen apareciendo trabajos en ladrillo con mucho carácter como ocurre en toda la zona de Aragón y en Toledo.

D) El ladrillo en los siglos XVII, XVIII y XIX

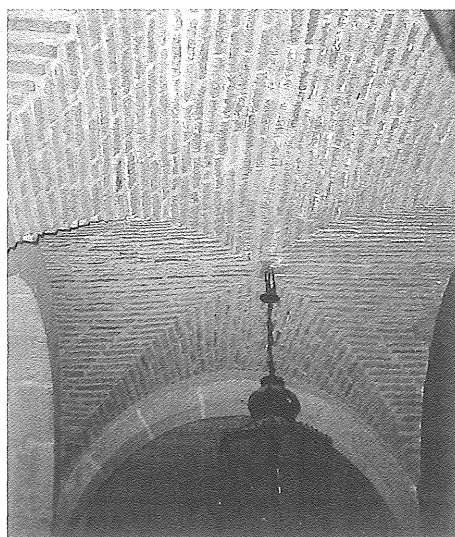
El uso del ladrillo sigue cayendo como material arquitectónico y manteniéndose, básicamente, como material constructivo. Así, en estos siglos, aunque los estilos evolucionan, no existe una vuelta a la arquitectura de ladrillo y éste, como mucho, se deja ver en muros lisos con paños ciegos o en machones y verdugadas reforzando mamposterías y tapias.

No aparece ninguna evolución especial en el uso constructivo del ladrillo y los tratados de la época lo contemplan como material para muros. Y así sigue hasta bien entrado el siglo XIX en donde tenemos un importante conjunto de tratados hasta llegar a su culmen, en España, con el de Albañilería, de Juan de Villanueva. En su capítulo X leemos:

“La obra de ladrillo es la más bella de la Albañilería, y por lo mismo pide toda la atención del Oficial. Usado el ladrillo con mezcla de cal y arena se construyen de él diferentes cuerpos, como son paredes gruesas y delgadas, pilastras o pilares, machos o machones, arcos y bóvedas”.



3.5. Contrafuertes de ladrillo en Calatayud.



3.6. Bóvedas “extremeñas” de ladrillo.

Sin embargo es a principios del XIX cuando se empieza a estudiar la función constructiva del ladrillo de un modo más científico y aparece el libro de Rondelet con los cálculos de resistencia de muros de ladrillo que después se irán copiando hasta finales de siglo.

E) El Neomudéjar y las construcciones modernas

Vemos, pues, la consideración general de material más pobre. Sin embargo, a medida que se alcanza la segunda mitad del siglo XIX el ladrillo va recuperando de nuevo su papel en la arquitectura. Aparece el ladrillo prensado que permite superficies muy lisas, con juntas prácticamente “a hueso” y, por tanto, con una mejor respuesta a las inclemencias atmosféricas. Aparecen, por otra parte, un sinfín de ladrillos aplantillados que permiten recuperar la decoración geométrica en las fachadas. Todo ello consecuencia, básicamente, de la Revolución Industrial.

A partir de ese momento podemos considerar dos funciones constructivas distintas, aunque simultáneas, para el ladrillo en la arquitectura. Por una parte, como material de construcción estrella de la albañilería. Por otra, y sobre todo a partir de 1870, llegando hasta 1930, el ladrillo visto como material de fachada, constituyendo, incluso, una hoja de fachada independiente del muro estructural, como si fuese un chapado exterior anclado a la estructura, que fue evolucionando hacia distintas formas y materiales y de los que quedan numerosos ejemplos en toda Europa, sobre todo en Inglaterra y el Norte de Francia, la mayoría con una decoración exterior geométrica que recuerda el mudéjar español y que se dió en llamar “neomudéjar”.

De ese “boom” de fachadas de ladrillo sea probablemente heredera la moda, todavía existente, de fachadas de ladrillo visto actuales, aunque desgraciadamente la “cicatería constructiva” de los años 60 haya desvirtuado enormemente su técnica constructiva hasta convertirla en un enorme fraude técnico que está pagándose actualmente con el conjunto de estados patológicos que presentan los edificios de esa época. Me refiero a las fachadas resueltas con 1/2 pie de ladrillo visto exterior, apenas apoyado en el borde de los forjados, aunque aparentando continuidad por delante de ellos, y que se sigue construyendo todavía como un sistema consagrado por la práctica. Esperemos que el buen juicio técnico de los nuevos arquitectos haga desaparecer esa defectuosa técnica.

En cualquier caso, ese neomudéjar que estamos considerando ha conseguido espléndidos edificios donde se ha sabido recuperar el valor propio de la arquitectura de ladrillo que tuviera, en su día, origen en la cultura española. Así encontramos edificios como la Plaza de Toros de las Ventas en Madrid, la Facultad de Medicina de Zaragoza, el Hospital de San Pablo

de Barcelona o la Feria Iberoamericana de Sevilla. Pero esta época moderna no sólo ha traído la recuperación de una “Arquitectura de Ladrillo” para fachadas, sino que ha desarrollado también hasta su apogeo la construcción de las bóvedas tabicadas, ayudada por la posibilidad de obtener ladrillos “ultraligeros” gracias a la producción industrial de rasillas. Distingue Moya dos grandes tipos; de superficie continua o con nervaduras y plementería. Las primeras, a su vez, las divide en cilíndricas, esféricas y de arista. Su desarrollo ha permitido solucionar grandes cubiertas de una forma sencilla y ligera, aunque incluyendo también opciones formales y volumétricas de otro modo inimaginables. Así tenemos desde las magníficas e ilustradas cubiertas de Gaudí hasta las más sencillas y majestuosas del propio Moya. Obras, todas ellas, que marcan hitos en la evolución constructiva y, sobre todo, en el uso de los materiales cerámicos.

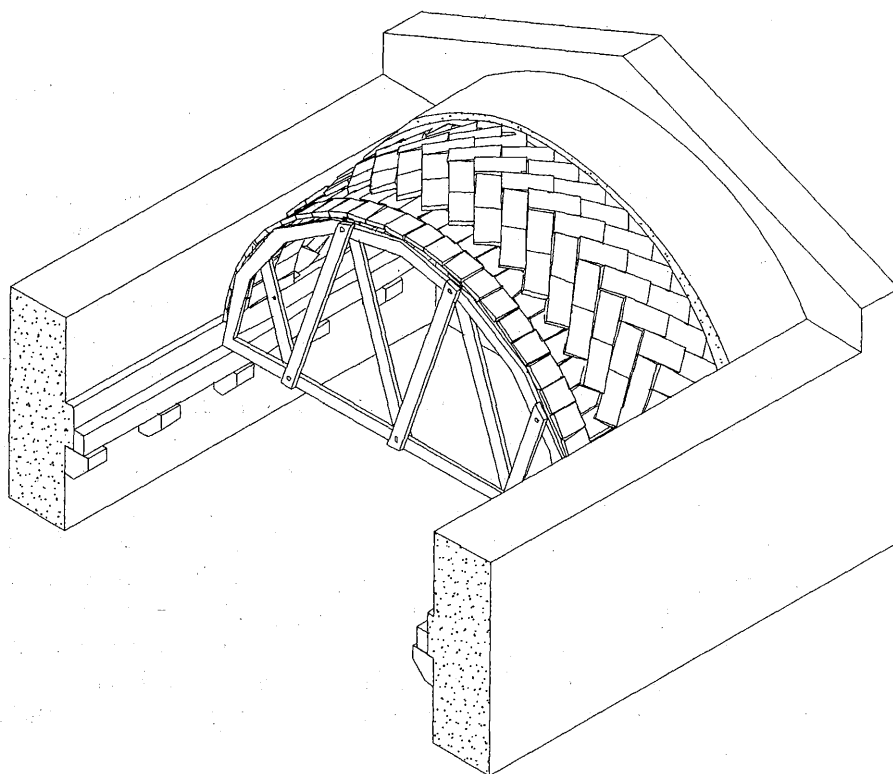


Fig. 3.7. Construcción de bóveda tabicada según L Moya.

1.5.2. Tipología constructiva

A) Cimentaciones

Ha sido muy corriente desde la época mudéjar, alternando con las de piedra machacada. Podemos distinguir tres tipos de soluciones:

- **Zanja corrida**, haciendo zarpa en ambos lados para aumentar la superficie de reparto cuando el terreno es uniforme.
- **Arcos de descarga**, complementados con pozos cuando hace falta buscar terreno compacto más profundo.
- **Pozos y cajones**, cuando tenemos que transmitir cargas puntuales elevadas (pilastras).

En cualquier caso, la cerámica cocida tiene la ventaja para su empleo como cimentación, de ser un material inerte.

B) Muros

Es quizás, el elemento constructivo de ladrillo más generalizado y más primitivo dada la razón de ser de la aparición del ladrillo como sustituto de la piedra.

De acuerdo con su técnica constructiva y su función podemos distinguir los siguientes:

- **Muros romanos**, entendiendo por tales los formados por dos caras (aceras) de ladrillo ("opus testaceum") con relleno de hormigón ("opus caementicium")
- **Muro mudéjar**, el macizo de ladrillo de tejar, de varios pies o astas (hasta 4) y con dibujos geométricos en sus caras (sobre todo la exterior) con llagas de gran espesor. Para mayor grosor del muro, se recurrirá a la técnica romana de rellenar el interior con hormigón pobre.
- **Muro neoclásico**, el convencional, macizo y de varias astas con llagas y tendeles enrasados por su exterior. En ocasiones, la cara exterior se resuelve con ladrillo prensado a partir de mediados del S. XIX.
- **Cerramiento neomudéjar**, extendido por toda Europa a partir de finales del siglo XIX, consistente en una hoja interior de muro de carga de ladrillo de tejar, de hasta 2 pies de espesor, y una hoja exterior de ladrillo prensado a cara vista, con decoración geométrica conseguida normalmente a base de ladrillos aplantillados. Esta segunda hoja de 1 ó 1/2 pie, va anclada a la interior mediante ladrillos que actúan de perpieños, o con grapas metálicas.

C) Arcos

Desde la construcción romana, el uso de ladrillos como dovelas para la construcción de arcos es solución corriente ya que a su facilidad de ejecución por lo manipulable del ladrillo se une la flexibilidad de formas. Existe, no obstante, una clara evolución que nos permite distinguir dos tipos:

- **El arco simple**, bien para resolver huecos en muros, bien arcos entre columnas.
- **El arco de lacería**, aportación oriental que nos llega a través de los árabes y que España difunde a Europa gracias al Mudéjar.

D) Bóvedas

También son los romanos los que inician el uso del ladrillo para este elemento constructivo. Podemos distinguir 4 tipos de soluciones:

- **Bóveda romana**, a base de nervaduras paralelas o radiales entramadas por otras perpendiculares consiguiendo un encasetonado que se rellena con hormigón. (Fig. 3.5)
- **Bóvedas bizantinas**, a base de una hoja continua de ladrillo colocado a sardinel. Se construyen soluciones de rincón de claustro, de arista o esféricas indistintamente. (Fig. 3.6)
- **Bóvedas mudéjares**, a base de nervaduras ojivales y plementería.
- **Bóvedas tabicadas**, a base de varias hojas de rasillas superpuestas, colocadas a panderete para obtener máxima ligereza. (Fig. 3.7)

1.6. LA CONSTRUCCIÓN CON PIEDRA

Podemos considerarlo como el material de construcción por excelencia en la cultura occidental y, concretamente, en la cuenca mediterránea donde tiene su origen nuestra civilización y, por tanto, nuestra arquitectura. La tierra y los ladrillos, como vimos, no dejan de ser sucedáneos de la piedra para zonas donde ésta escasea. La utilizaron las civilizaciones más antiguas egipcias, cretenses y micénicas y la potenciaron los griegos hasta su máximo esplendor. Heredaron los romanos las técnicas constructivas helénicas aunque, como hemos visto, supieron aprovechar al máximo sus características y mezclarlas con otros materiales más artificiales para conseguir una importante economía en las construcciones. En cualquier caso, Vitrubio la pondera como material esencial en la Arquitectura y así hacen todos los tratados a partir del Renacimiento.

La idea del origen de las piedras era confusa ya entre los romanos y lo seguía siendo en 1796 cuando D. Benito Bails en su libro “De la Arquitectura Civil”, después de afirmar que “*De cuantos materiales se gastan en las fábricas, el más útil es la piedra*” nos dice: “*Aunque ignoramos el rumbo que sigue la*

naturaleza al formar las piedras en las entrañas de la tierra, parece que lo primero que cría es el corazón, desde el cual va prosiguiendo su obra hacia la superficie. De aquí es que cuando se sacan piedras de una cantera, se las halla lejos del corazón una porción o corteza blanda, que llamaríamos blandura, y parece ser una piedra sin cuajar”.

Arredondo en su libro de materiales nos dice *“Uno de los primeros materiales de construcción que utilizó el hombre es la piedra, y muchas de las construcciones de piedras de la antigüedad han llegado a nosotros debido a las magníficas características de dichos materiales para resistir la acción atmosférica”.*

1.6.1. Tipología constructiva con el uso de la piedra

Veamos las distintas unidades constructivas resueltas con piedra como material, desde las estructurales hasta las de acabados.

A) Cimentaciones

En las regiones mediterráneas la edificación se debía cimentar siempre “sobre roca”, y a falta de ella, había que crearla. Baste recordar las conocidas citas bíblicas, o acotar a D. Benito Bails, en la obra citada, donde al hablar de las rocas nos dice:

“Por consiguiente es principio cierto que en igualdad de circunstancias la piedra que más pesare será la que más resista, y la que con preferencia a otra cualquiera deberá emplearse en los cimientos de los edificios”.

Así, cuando no se encontraba roca cerca del nivel del terreno, se recurría a rellenar las zanjas con piedra machacada y prensada, mezclada, bien con barro, bien con mortero de cal, precursores evidentes de las actuales cimentaciones de hormigón. La evolución ha llevado a los edificadores desde la búsqueda de la roca para cimentar, a la construcción de la propia roca, el hormigón, a la medida del edificio y del terreno. Se ha mantenido así el uso de la piedra en la cimentación a lo largo de la historia. En definitiva, la piedra, natural o artificial, sigue siendo la cimentación más segura.

B) Muros

Me refiero a aquellos en los que la piedra es material “constitutivo” y no solo de acabado. Juan de Villanueva, en su “Arte de albañilería” nos dice:

“Las construcciones de piedra son de dos modos en cuanto a su forma: una tosca e irregular conforme sale de la cantera, y otra labrada y regular: la irregular se llama mampostería, y pertenece al Albañil; y la regular cantería, ramo y arte diverso, que necesita tratado diferente por el estudio que pide el modo de cortarla, labrarla y ponerla en obra”.

De la primera, dice el mismo Villanueva: *“La piedra tosca, que se halla sobre la superficie de la tierra, o en canteras someras y fáciles, o en las subterráneas, y que tiene figura irregular, es de mucho uso para hacer muros y paredes. Hácense de tres maneras, una sin mezcla alguna, que llamamos de piedra seca; otra con mezcla de barro, y otra con mezcla de cal y arena”*.

Tenemos, pues, por un lado, la “mampostería en seco” y, por otro todas aquellas en que se usa algún tipo de aglomerante. De éstas, la clasificación tradicional se basa en el aspecto y tratamiento de la superficie vista. Así se considera la llamada **tosca**, en la que no se somete al mampuesto a ninguna elaboración previa sino es la simple selección por forma o tamaño (el romano “opus incertum”). A medida que vamos trabajando sobre la forma de la pieza, resulta una mampostería más regular que va adquiriendo diversos nombres. Así tenemos, la **careada** de la que Vitrubio decía en su libro segundo: ... *“la otra estructura, o pared, es la que los griegos llaman “emplecton” de la cual también usan nuestros rústicos, labrando los frentes de las paredes, dejándose lo demás tosco, y por labrar, asientan las piedras con la cal y juntadas con argamasa. Mas los nuestros teniendo cuenta con que la obra se acabe presto, poniendo hiladas de piedra levantadas, y derechas, sirven a las haceras de la pared, y el medio hínchenlo de ripios menudos, quebrados de piedras y apartados con la materia de la cal...”*

Dando un paso más en la elaboración del mampuesto, llegamos a la llamada **concertada**, en la que además de trabajar alisando la cara exterior, se preparan también las laterales, tanto lecho y sobrelecho, como las llagas, dejando únicamente sin trabajar el trasdós, a menos que se trate de una pieza llave que va de un lado al otro del espesor del muro, por lo que resulta una pieza con dos caras vistas (dos parámetros).

Dentro de ésta mampostería concertada, se han distinguido normalmente dos tipos según la forma del mampuesto. Así, se ha hablado de **mampostería poligonal**, en la que el paramento de cada pieza tenía más de cuatro lados (normalmente cinco o seis) y de **mampostería regular** con paramentos rectangulares, que, por similitud, se ha acabado denominando silla-rejo.

En cuanto al material, la piedra, Juan de Villanueva nos dice en su cita-da obra:

“Debe preferirse para la mampostería la piedra más dura, y por consiguiente la más pesada, y la de figura más regular y que más incline al cuadrado, y en su defecto la más angulosa, para que se pueda sentar y trabar mejor una con otra. La que se aproxima a la figura esférica no traba ni



3.7. Torreón de mampostería de piedra cimentado directamente sobre roca.

enlaza bien; y la demasiado redonda es difícil de asegurar, y muy expuesta a rodarse y a deshacerse los cuerpos que con ella se construyen: sin embargo, si es pequeña y bien unida con buena mezcla forma cuerpos de maravillosa duración. Los antiguos siempre prefirieron en sus obras la mampostería de piedra menuda, y no sé por qué razón se desea ahora la más crecida”.

En la ejecución, el punto fundamental está en el aparejo y en el tipo del mortero. Al buscar aparejos y trabas más fuertes, aparecen las mamposterías mixtas, a base de verdugadas de sillares o ladrillo, con rafas o cantos del mismo material, lo que en estos parajes se ha dado en llamar “mampostería toledana”.

Si damos el salto y pasamos a la pieza de piedra más elaborada en todas sus caras, y con mayores dimensiones, nos encontramos con la sillería. Se trata, evidentemente, de una mejora en la calidad del muro, tanto en su aspecto como en su integridad fisicoquímica, ya que pasamos de un porcentaje de piedra en el volumen total de la mampostería que varía entre un 60% y un 80%, según el tipo de que se trate, a prácticamente un 100% en la sillería, dando por supuesto que la piedra es de las carac-

terísticas adecuadas y, por lo tanto, más resistentes al paso del tiempo que el mortero de agarre o la argamasa de que se trate.

Sin embargo, varía algo el sistema estático de la fábrica. Si en la mampostería los puntos básicos eran el aparejo (trabazón entre piezas por superficie de contacto y rotura de juntas) por un lado, y por otro la cohesión que introduce la argamasa, que suele tener continuidad en toda la fábrica (sobre todo con mampuestos pequeños) y que hace que el muro se comporte como un conjunto, en la sillería, sin embargo, la única base es la trabazón dada por el aparejo, incluyendo las posibles llaves metálicas o pétreas y, por tanto, el peso de los propios sillares y el rozamiento entre ellos. De ahí que cobre importancia ahora la llamada “estereotomía” de la piedra, de la que se han escrito verdaderos tratados.

Esta mejora evidente de aspecto y calidad ya la reflejaba Vitrubio refiriéndose al modo de construir de los Griegos en su tiempo, pues después de explicar la mampostería careada que hacen los romanos a base de tres capas, dos “hazeras” y un relleno interior, dice:

...“Los Griegos no edifican assi, antes assentádo llanas las piedras, y engrosando lo largo de las hiladas con junturas, no echan nada en medio, más de sus sillares, que travan todo el muro, hazen una mesma grosseza en la pared. Y demás desto entreponen sus piedras con hazeras de entramas partes, porque atraviessan todo el muro, que los Griegos llaman diatonus. La quales piedras ligando, y travando confirman y sueldan la pared”.

También de la sillería se han hecho clasificaciones diversas, en función de la forma de los sillares (recta y aplantillada) del tratamiento de la cara exterior o paramento (almohadillada, pulimentada, uñeteada, apiconada, averrugada, punteada, etc) o, por último, del tipo de aparejo (isodomo, pseudoisodomo o diatónico). No voy a entrar en su análisis, por constituir, junto con la esterotomía, capítulo aparte.

C) Estructuras y refuerzos

Podemos englobar aquí, por una parte, todo tipo de pilares, arcos y bóvedas y, por otra, todos los refuerzos de partes especiales de muros tales como esquinas y huecos.

Los **pilares** son lo que podríamos llamar “la perfección de la sillería”, ya que sus piezas necesitan el grado más alto de elaboración de sus caras, tanto para su encaje como para su aprovechamiento estructural como, en fin, para su aspecto formal y proporción (la historia de la arquitectura estudia los órdenes clásicos en función, sobre todo, del diseño de sus colum-

nas). Suponen, así, el resumen en piedra de un estilo arquitectónico donde pasamos del “peso” de la técnica constructiva a la ligereza del elemento, de lo grueso a lo fino, en fin, de lo grosero a lo estilizado. Su ejecución exige, por supuesto, una mayor atención al detalle y, por tanto, a la estereotomía de cada pieza así como al labrado de sus caras vistas y, por supuesto, a su ejecución en obra con las características de linealidad, verticalidad, aplomado, etc ... Todo ello lleva a la necesidad de un estudio específico de los despieces de estos elementos que aparecen en libros singulares, a los que remitimos.

Los **arcos** son como la materialización de las líneas de esfuerzos (antifunicular de cargas) que una obra de fábrica transmite a sus extremos. Son esfuerzos a compresión y necesitan que su diseño y ejecución permita esa transmisión a través de las distintas dovelas que lo componen. Se convierten, entonces, en unos “pilares torcidos” que exigen también una enorme precisión en su ejecución. Forman parte, por tanto, de esa “perfección de la sillería” mencionada más arriba.

Las **bóvedas** son a los arcos como los muros a los pilares. Así pues, superficies curvas que transmiten esfuerzos de compresión a través de sus dovelas, desde la clave a los arranques, precisando asimismo una elaboración muy cuidada, tanto en su estereotomía para el engarce adecuado, como en su labra superficial, pues al fin y al cabo forman parte de la decoración interior de los locales que cubren.

También es importante destacar que si en los muros y pilares el esfuerzo de compresión sólo se ve perturbado con tracciones o flexiones cuando aparecen acciones disonantes a la concepción original del edificio, como pueden ser los movimientos sísmicos, o cuando apuramos mucho su sección entrando en peligro su esbeltez, por el contrario, en arcos y bóvedas es relativamente fácil el que aparezcan esfuerzos de flexión cuando su curva no siga con precisión la línea de distribución de esfuerzos principales de compresión que, como sabemos, tiende a ser una parábola, y no es esa, precisamente, la curva geométrica más corriente en el diseño de arcos y bóvedas.

En la realidad se han conocido muchos colapsos por esta disfunción de diseño, lo que refuerza la importancia de la “perfección” en la elaboración de esos elementos.

Las **esquinas** de edificios resueltos con obras de fábrica de dudosa o débil trabazón (mamposterías) se han reforzado generalmente con labor de sillares con entrega suficiente en sus adarajas y endejas como para conseguir con holgura la integridad del conjunto, aunque no siempre se haya conseguido. Son partes de muros de sillería que “ennoblecen” y le dan integri-

dad a las fábricas más pobres y como tales se ven afectadas por las indicaciones de párrafos anteriores.

Lo mismo podemos decir de los **recercados de huecos**, de gran tradición en la arquitectura mediterránea, con tres elementos constructivos fundamentales, jambas, antepecho y dintel. Su misión principal es la de reforzar el muro de fábrica en una “herida” de carácter funcional y conseguir la máxima continuidad en el recorrido de los esfuerzos de compresión que descienden por el muro, con un juego de transmisiones de dintel a jambas que hace que aquel tenga que trabajar a flexión, a menos que se le de la curvatura suficiente como para que sólo lo haga a compresión, aunque sea pasando por el borde de su núcleo central de inercia. Así han aparecido los dinteles adovelados, más o menos rectos, en los que, según su luz, se consigue esa transmisión exclusivamente de compresiones. Las jambas, por su lado, requieren una buena trabazón con el resto de la obra de fábrica como para conseguir participar con ella de las cargas que han recibido del dintel. Por ello, no es inconveniente el que sean de varias piezas, si la trabazón es suficiente. El antepecho, aunque menos importante desde el punto de vista estructural, también tiene su papel en el conjunto de la transmisión de esfuerzos como acodalamiento o “tirante” de las bases de las dos jambas y, en cualquier caso, tiene una misión constructiva necesaria como remate superior del resto de la fábrica bajo el hueco. Los tratadistas de la construcción de los siglos XVII y XVIII dedicaron muchas páginas a discutir sobre la integridad constructiva de este elemento.

Las **pilastras y contrafuertes** como elementos de contrarresto de cargas horizontales, necesita masa y trabazón suficiente. Se suelen ejecutar en el mismo tipo de obra de piedra que el resto y pueden ser también, refuerzos de otras fábricas.

Los **pináculos**, como elemento de centrado de cargas inclinadas para reducir desplazamientos horizontales, tienen además una función decorativa, por lo que suelen realizarse en piedra, incluso en fábricas de otros materiales.

2. LESIONES Y SUS CAUSAS

Los procesos patológicos que pueden sobrevenir en las estructuras de fábrica suelen tener un origen doble. Por un lado los materiales constitutivos, por otro, el propio elemento. En el primer caso se tratará, sobre todo, de procesos físicos y químicos que afectan principalmente a su superficie exterior, mayores cuanto más expuestos están a los agentes exteriores, y que redundan en lesiones también físicas o químicas. En el segundo, por el contrario, nos encontramos generalmente con procesos patológicos de carácter mecánico y sus lesiones consiguientes.

2.1. LESIONES FÍSICAS

Podemos encontrarnos todos los tipos de lesiones físicas corrientes en cerramientos de fachada, afectando a cualquiera de los materiales analizados, a saber:

- Humedad

- *De obra*, sólo en los casos de obras nuevas o reparaciones.
- *Capilar*, en los arranques.
- *De filtración*, mayor cuanto más expuesto.
- *De condensación*, sobre todo de tipo higroscópico cuando ha habido aportación de sales de ese tipo.
- *Accidentales*, principalmente en coronaciones como consecuencia de sumideros, gárgolas y bajantes.

- Suciedad

- *Por depósito*, muy corrientes en zonas urbanas.
- *Por lavado diferencial*, cuando existen concentraciones y cambios de escorrentía.

- **Erosión física**, mayor cuanto más expuesto está el elemento constructivo a los agentes atmosféricos y cuanto más heladizo sea el material, lo que depende de su coeficiente de absorción y de su estructura porosa.

Este conjunto de lesiones se analiza ampliamente en el trabajo citado de patología de cerramientos y acabados arquitectónicos, por lo que a él remitimos. No obstante, en el apartado siguiente se hacen algunas puntualizaciones necesarias.

2.2. LESIONES QUÍMICAS

Aparecen también la mayoría de lesiones químicas de las fachadas de los edificios,

consecuencia de ataques exteriores, afectando a los tres tipos de materiales en función de su composición mineralógica. Así tenemos:

- **Eflorescencia**, como lesión más corriente en ladrillos cerámicos y en piedras calizas (sedimentarias, en general) así como en los morteros de agarre. Cabe mencionar que en los edificios históricos sus posibles eflorescencias ya suelen haber desaparecido con el transcurso de los años, a menos que la humedad que sufren ahora sea nueva y actúe sobre paramentos que no se habían visto afectados con anterioridad. Esto es corriente en muros de ladrillo que habían estado tradicionalmente protegidos por revocos de mortero y que ahora se descarnan por mor de hacer aparecer el teórico material original. En este momento el ladrillo entra en contacto directo con la atmósfera e inicia procesos de meteorización, además de posibles eflorescencias si contiene sales solubles. También pueden aparecer eflorescencias cuando se aportan nuevos materiales o productos que puedan contener sales solubles y que se encuentren en el recorrido de la humedad que las saca al exterior.
- **Organismos**, considerados como asentamiento de colonias de mohos, líquenes y musgos, llegando a la aparición de gramíneas e incluso plantas de porte con raíces metiéndose por los intersticios. También debemos considerar el efecto de los excrementos de aves menores (palomas, golondrinas, etc) con ataques químicos a las piedras, y la construcción de nidos de cigüeñas que pueden sobrepasar, en peso, la carga admisible por algunas bóvedas y cubiertas. Por último, deberíamos tener en cuenta el ataque de los xilófagos (coleópteros y termitas) a los elementos leñosos que forman parte de los entramados de muros.
- **Erosión química**, que afecta principalmente a las piedras según su composición mineralógica y que provoca los efectos conocidos de:
 - *Decementación*, con pérdida superficial de material, que afecta también a los morteros de agarre y rejuntado, además de los revocos.
 - *Costras y pátinas*, como consecuencia de la alteración mineralógica por reacción química de los componentes de las piedras con los contaminantes aéreos.
 - *Alveolos*, derivados de las dos anteriores, con evidente perjuicio para la superficie exterior.

Al igual que en el caso de las físicas, se trata de lesiones que afectan fundamentalmente al aspecto exterior de las obras de fábrica y no tanto a su función estructural. Por ello, no se estudian con carácter general en este trabajo y remitimos al lector al de patología de cerramientos y acabados arquitectónicos ya mencionado.

2.3. LESIONES MECÁNICAS

Son, podríamos decir, las lesiones específicas de los elementos estructurales de fábrica, que suelen ser independientes del material constitutivo y que, sin embargo, son consecuencia del modo de trabajar de las fábricas, es decir, mampuestos unidos con argamasa trabajando a compresión y manteniendo su unidad frente a las cargas externas gracias a la trabazón que introduce su aparejo.

Podemos considerar dos grupos de lesiones, las deformaciones y las roturas.

2.3.1. Deformaciones

Consisten en la pérdida de la geometría inicial del elemento como consecuencia de las cargas que actúan sobre él, sin llegar a romperlo. Podemos considerar varios tipos según el sentido de la deformación, lo que, a su vez, depende de la dirección de las cargas que la producen.

- **Desplome**, o pérdida de verticalidad (pérdida del “plomo”) del elemento como consecuencia de una acción horizontal directa (empujes de tierra) o de una indirecta provocada por la excentricidad de la carga vertical que actúa sobre el elemento en cuestión. También debemos considerar la pérdida de verticalidad al salirse del plano, caso de los asientos como consecuencia del fallo de continuidad de apoyo en la base. Afecta a todos los elementos de fábrica verticales (muros, pilastras, arcos, etc). En el caso de arcos y bóvedas, llamamos así también a la pérdida de su directriz como consecuencia de la bajada de la clave y desplazamiento hacia afuera de los riñones o bien el desplazamiento horizontal de todo el conjunto por cedimiento de sus apoyos..
- **Alabeo**, cuando esta pérdida de verticalidad no afecta por igual a todo el elemento sino que resulta más marcada en unos tramos que en otros. Entonces la forma resultante es sinuosa y, por tanto, alabeada.
- **Pandeo**, cuando se produce un abombamiento como consecuencia de una carga vertical excesiva que introduce un esfuerzo de flexión en el tramo central cuya sección no es capaz de soportar. Afecta, lógicamente, a elementos verticales esbeltos y suele producir roturas horizontales en el centro del elemento. Cuando un muro esté sometido a una compresión horizontal en su plano también puede aparecer un pandeo, aunque en este caso la forma resultante se asemejará a un alabeo. Esto suele ocurrir, sobre todo, cuando se limita la posibilidad de dilatación de los muros exteriores que transforman esa dilatación en una compresión horizontal sobre sí mismos.

2.3.2. Roturas

Cuando la deformación es muy importante o la fábrica es muy rígida (poco deformable) aparecen las roturas en forma de grietas, que atraviesan todo el elemento, fisuras, que solo afectan a un determinado espesor superficial del mismo, o desprendimientos, que suponen una caída de parte de ese espesor.

Ello es consecuencia directa del funcionamiento mecánico de las obras de fábrica, sobre todo en muros. En efecto, de acuerdo con la figura 3.8, la carga vertical que recibe un elemento de la obra de fábrica se puede descomponer en dos fuerzas inclinadas, más o menos simétricas y perpendiculares a la superficie de contacto con los elementos adyacentes a la hilada inferior. A su vez, cada una de esas fuerzas se descompone en una vertical, que sigue la transmisión hacia abajo, y una horizontal que, combinada con su simétrica, introduce un esfuerzo de tracción horizontal en el conjunto que puede llegar a romper la fábrica y convertirse en grietas. Ante ese esfuerzo, la propia obra se defiende con el aparejo de sus elementos que hace frente a la tracción gracias al rozamiento entre sus hiladas.

A) Grietas.

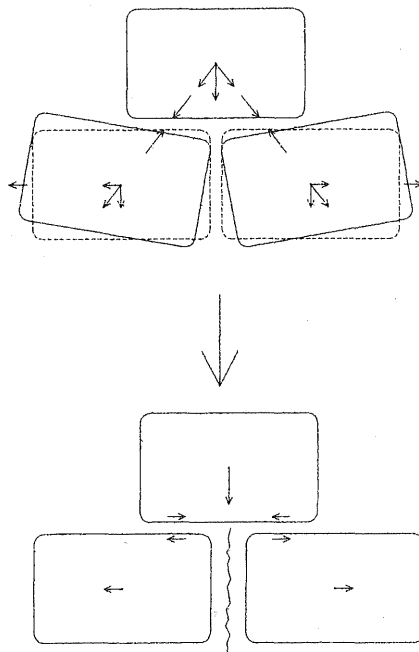
Pueden ser de diversos tipos según la forma que adquieran y la carga que las produce. Veamos las más representativas.

A.1. Por **asiento puntual**, pueden aparecer:

- Grietas verticales en V (normal o invertida).
- Grietas paralelas a 45 grados.



3.7. Grieta en arco ojival de ladrillo.



3.8. Funcionamiento mecánico ante cargas verticales.

En los arcos y bóvedas, consideramos los asientos de sus apoyos, tanto por descenso como por apertura. Entonces, la deformación que sufre suele provocar la apertura de las juntas entre dovelas y aparecen los siguientes tipos:

- En **arcos**

- Por apertura de apoyos:

- Grieta en una de las uniones de la clave en su intradós.
- Grieta en los “riñones” en su trasdós.

- Por descenso de un apoyo:

- Grietas alternadas en riñones (trasdós e intradós).

- En **bóvedas**

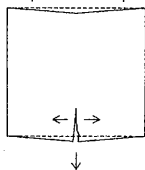
- Por apertura de apoyos:

- Grieta longitudinal en clave por el intradós.
- Grieta longitudinal en riñones por el trasdós.

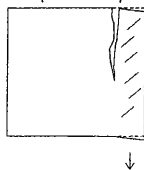
- Por descenso de un lateral:

- Grietas longitudinales alternadas en riñones (trasdós e intradós).

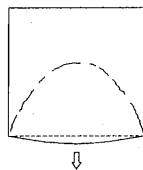
ASIENTO PUNTUAL CENTRAL
(V invertida)



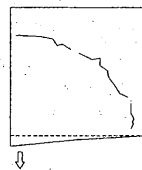
ASIENTO PUNTUAL LATERAL
(V normal)



ASIENTO CONTINUO CENTRAL



ASIENTO CONTINUO LATERAL



ASIENTOS EN BOVEDAS

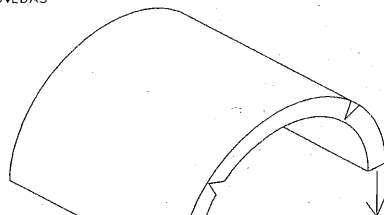
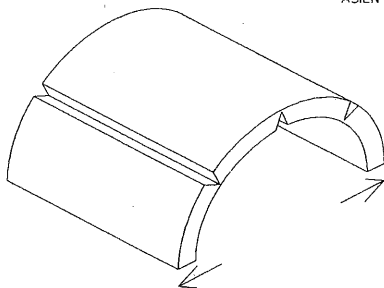


Fig. 3.9. Grietas debidas a asientos.

A.2. Por **asiento continuo**:

- Grietas en arco de descarga.
- Grietas verticales en V invertida en el centro del tramo que asienta.
- Grietas verticales en esquinas por esfuerzo cortante entre el muro que asienta y los perpendiculares, de modo similar a los asientos puntuales.

A.3. Por **desplome** producido por cargas horizontales, aparecen:

- Grietas horizontales por rotación en el centro del vano, en la parte convexa.
- Grietas horizontales por esfuerzo cortante coincidiendo con una hilada de la fábrica en la parte alta por debajo del elemento que empuja (forjado o bóveda).
- Grietas verticales en esquinas al separarse el muro que se desploma de los perpendiculares rompiendo el aparejo.
- Grietas horizontales longitudinales en bóvedas, en el centro y en los riñones.

A.4. Por **pandeo**:

- Grietas horizontales en el centro del vano, en la parte convexa

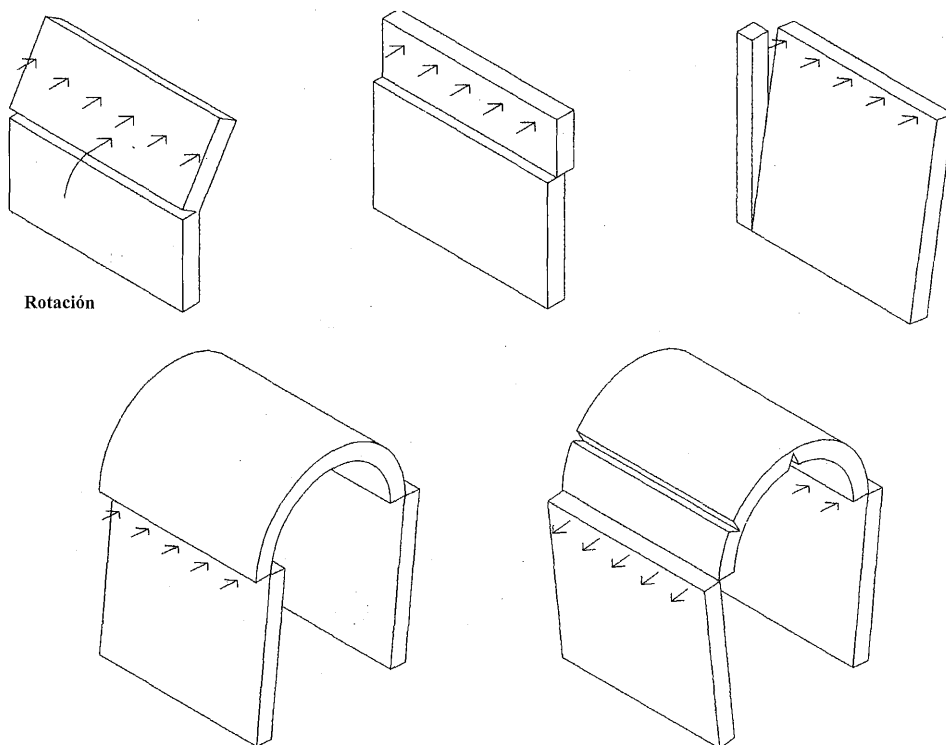


Fig. 3.10. Grietas por desplome.

A.5. Por **empuje de muros** perpendiculares al dilatarse:

- Grietas verticales en esquinas y encuentros por esfuerzo cortante que rompe el aparejo.

A.6. Por **agotamiento de la traba**, cuando la carga vertical que recibe el elemento es importante e introduce un esfuerzo horizontal que la trabazón de la fábrica es incapaz de absorber. El muro se “abre” y aparecen grietas verticales “en tonel” aisladas, o más o menos repetidas a distancias variables según el tipo de fábrica.

Ya hemos comentado que en las obras de fábrica las cargas verticales se trasforman en horizontales al apoyar cada elemento en otros dos de la hilada inferior, por lo que resulta fundamental la trabazón en horizontal para mantener unido y consistente el conjunto (fig. 3.8). Cuando aparecen esas grietas resulta un síntoma claro de agotamiento de la capacidad de absorber esfuerzos horizontales con evidente peligro de la estabilidad del conjunto. Estas grietas resultan más peligrosas en elementos de pequeña dimensión como machones y pilastras.

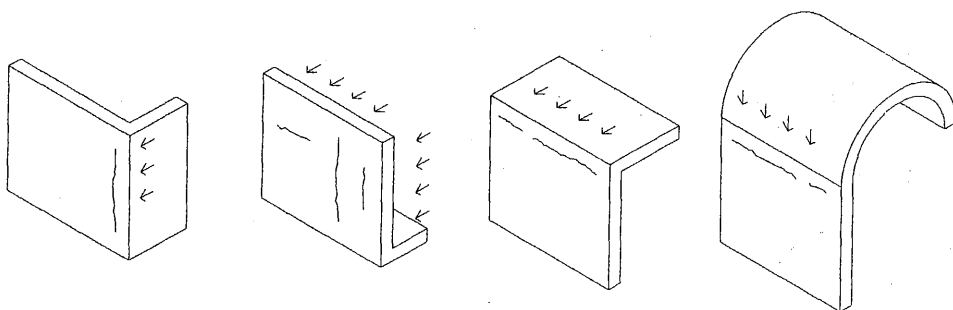


Fig. 3.11. Grietas por empuje de muros perpendiculares.

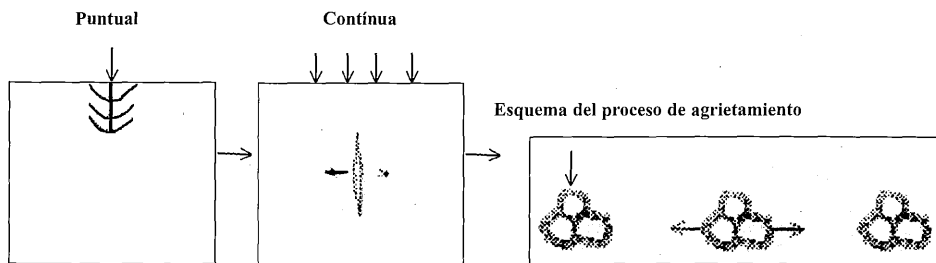


Fig. 3.12. Grietas por agotamiento de traba.

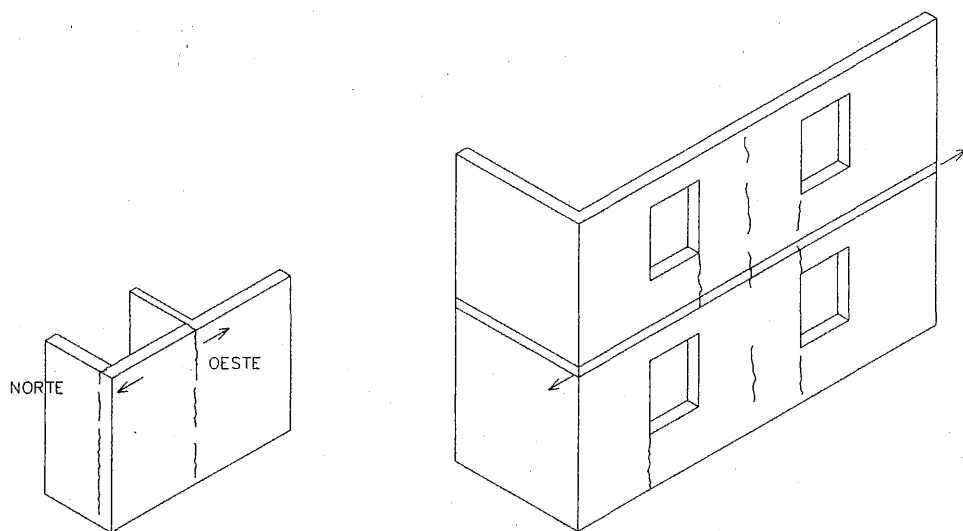


Fig. 3.13. Dilatación y contracción.

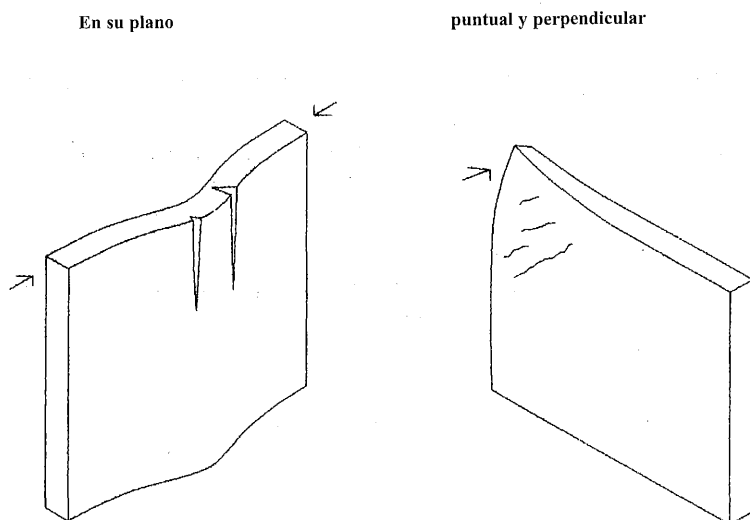


Fig. 3.14. Grietas por alabeo.

A.7. Por **dilatación y contracción** (al contraerse):

- Grietas verticales uniformes en el centro de los muros que son cerramiento exterior o en cambios de plano o sección.
- Grietas transversales en bóvedas de cañón.

A.8. Por **alabeos**:

- Grietas verticales en V en las zonas más curvadas por su cara convexa.

B) Fisuras

Las fisuras en elementos estructurales suelen aparecer como consecuencia de las deformaciones que curvan el elemento de fábrica fuera de su plano, viéndose en la cara convexa y afectando a la capa superficial cuando ésta es distinta del resto de la fábrica, es decir, en los casos de enfoscados, revocos, guarnecidos y tendidos, así como alicatados y chapados. No existe una diferencia clara con las grietas en cuanto a su proceso patológico ya que se trata de una primera fase del mismo. Otra cosa son las fisuras propias del acabado por retracciones hidráulicas o térmicas entonces es un proceso patológico independiente de la función estructural del elemento, que es consecuencia de su función de cerramiento, así como de acabado del propio recubrimiento afectado, por lo que su estudio corresponde al de patología de acabados y a sus tratados remitimos. En consecuencia, las fisuras que ahora nos interesan se pueden reducir a los siguientes procesos:

B.1. Por **desplome** (fig. 3.10)

- Fisuras horizontales por rotación del muro en el centro de la cara convexa.
- Fisuras longitudinales en la clave o en los riñones de las bóvedas de cañón.

B.2. Por **alabeo** (fig. 3.14)

- Fisuras verticales en la parte convexa de las más alabeadas, normalmente en la parte alta de los mismos.

B.3. Por **pandeo**

- Fisuras horizontales en el centro de la cara convexa.

C) Derrumbamientos

Nos referimos a la pérdida de masa superficial, aunque constitutiva del muro, por desmoronamiento. No conviene confundirlo con la lesión desprendimiento de los acabados de los cerramientos que implican un fallo de la adherencia entre soporte y acabado. Ahora se trata de la rotura interna del propio elemento constructivo de fábrica por conjunción de, al menos, dos factores. Por un lado, deficiencia en la cohesión interna de la fábrica, por otro, un esfuerzo de tracción interno que provoca, bien un esfuerzo rasante entre la parte que se desprende y la que se queda, bien un pandeo interno que “desgarra” la fábrica transversalmente.

Por esos orígenes, suelen ser corrientes en fábricas con una trabazón muy ligera entre sus componentes y, sobre todo, en las de tapia.

3. TÉCNICAS DE REPARACIÓN

Las técnicas de reparación en obras de fábrica pueden ser tan variadas como variados son los materiales y elementos constructivos, así como los procesos patológicos que pueden acontecer, por ello no es posible barrer todas las técnicas a emplear. No obstante, podemos intentar una agrupación en función de esos procesos y, sobre todo, de los criterios constructivos que apliquemos en cada caso. Ello nos permitirá describir las técnicas más representativas, que se deberán ajustar en cada caso según las condiciones constructivas y funcionales que debamos resolver. Por ello, entiendo que el camino lógico será recorrer los distintos elementos constructivos y, dentro de cada uno de ellos, plantear las reparaciones más adecuadas a cada uno de los procesos patológicos estudiados en el apartado anterior, bien entendido que nos limitaremos, básicamente, a las lesiones mecánicas, remitiendo para las físicas y químicas a las publicaciones correspondientes.

3.1. MUROS

Son susceptibles prácticamente de todos los tipos de lesiones estudiadas, tanto deformaciones como roturas. Para su correcta reparación será necesario, en primer lugar, el desarrollo de un correcto diagnóstico en donde queden definidos con precisión, tanto las causas que han originado el proceso como la evolución del mismo así como las lesiones resultantes. La reparación deberá resolver primero la anulación de las causas antes de arreglar la lesión y recuperar el estado original del elemento constructivo, si cabe; de lo contrario, podemos encontrarnos de nuevo con la lesión en un breve plazo. Por ello será importante conocer el proceso completo en cada caso antes de describir las posibles técnicas de reparación.

3.1.1. Reparación de deformaciones

Me refiero, tanto a desplomes como a alabeos y pandeos. Como ha quedado dicho, pueden haber sido provocados por una acción horizontal directa (empuje de tierras o dilatación de estructura horizontal, forjados o bóvedas) o por la excentricidad de la carga vertical que recibe el muro. En cualquiera de los dos casos, la anulación de la acción horizontal puede alcanzarse por tres vías; bien creando una nueva estructura paralela al propio muro, bien ejecutando un refuerzo del muro que le dé mayor resistencia ante la acción y le permita su contención, bien demoliendo y ejecutando un nuevo muro. La primera vía la utilizaremos cuando la deformación sea muy importante y la nueva geometría no posibilite el refuerzo, o cuando el proceso patológico haya debilitado tanto el muro que su refuerzo sea imposible. Por el contrario, dicho refuerzo será la solución adecuada si la intervención permite seguir manteniendo la imagen y función constructiva y estructural del muro sin menoscabo. Por fin, la demolición y sustitución será la solución necesaria cuando el muro original haya sufrido una deformación irreparable.

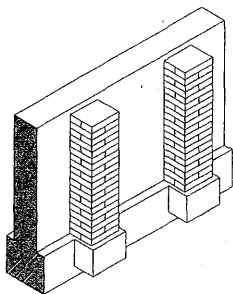
A) Nueva estructura

Será tal que, o bien quede totalmente oculta o bien resulte claramente aparente, expresando sinceramente su misión y con posibilidad de eliminación en caso de nuevas actuaciones. Veamos algunos casos claros:

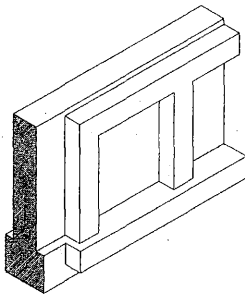
A.1) Si se trata de un **muro** (de cualquier material) **que contiene el terreno**, los empujes de éste se pueden absorber de varias formas:

- Mediante un **muro de hormigón armado previo**, oculto, entre terreno y muro. Su cálculo y diseño resulta elemental y aparece en los manuales al efecto.

PILASTRAS EXTERIORES DE FABRICA



ESTRUCTURA EXTERIOR PORTICADA



ANCLAJES DIRECTOS

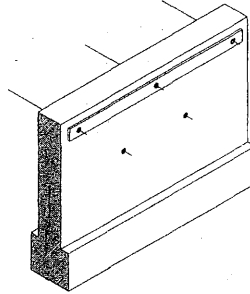


Fig. 3.15. Reparación de muros de contención con nueva estructura.



3.9. Contención horizontal de muro de carga con perfiles metálicos y tirantes embutidos.



3.10. Estructura de contención de muros de fábrica.

- Mediante **pilastras interiores** de hormigón armado o de la misma fábrica, bien ancladas al muro y con su correspondiente cimentación. El anclaje puede hacerse con mechinales en la fábrica del muro o mediante tirantes metálicos que lo atraviesan. Resulta también una solución oculta y su cálculo aparece en los manuales correspondientes.
- Mediante **pilastras exteriores**, normalmente de la misma fábrica (contrafuertes), que contienen el conjunto y que requieren la cimentación adecuada. Se trata de una solución aparente que requiere un análisis histórico y formal muy claro.
- Mediante **estructura porticada exterior**, de hormigón armado o metálica, con su correspondiente cimentación, que sujeta todo el conjunto. Sin duda se trata de la solución más drástica y que requiere un estudio histórico formal más completo. En cualquier caso, la nueva estructura no debe dañar a la de fábrica que tiene que poderse recuperar.
- Mediante **anclajes directos al terreno**. En este caso, habrá que calcular la distancia entre anclajes en función de la inercia de la fábrica existente, de su estado de deterioro y de la posibilidad de introducir una estructura exterior de reparto de cargas entre anclajes.

A2) Si se trata de un **muro que recibe cargas verticales** con suficiente excentricidad como para provocar el desplome de su coronación, podremos contener la componente horizontal que lo provoca mediante la ejecución de una nueva estructura que absorba las cargas verticales, descargando el muro existente y eliminando así el proceso. Esta nueva estructura podrá localizarse de distintas formas, a saber.

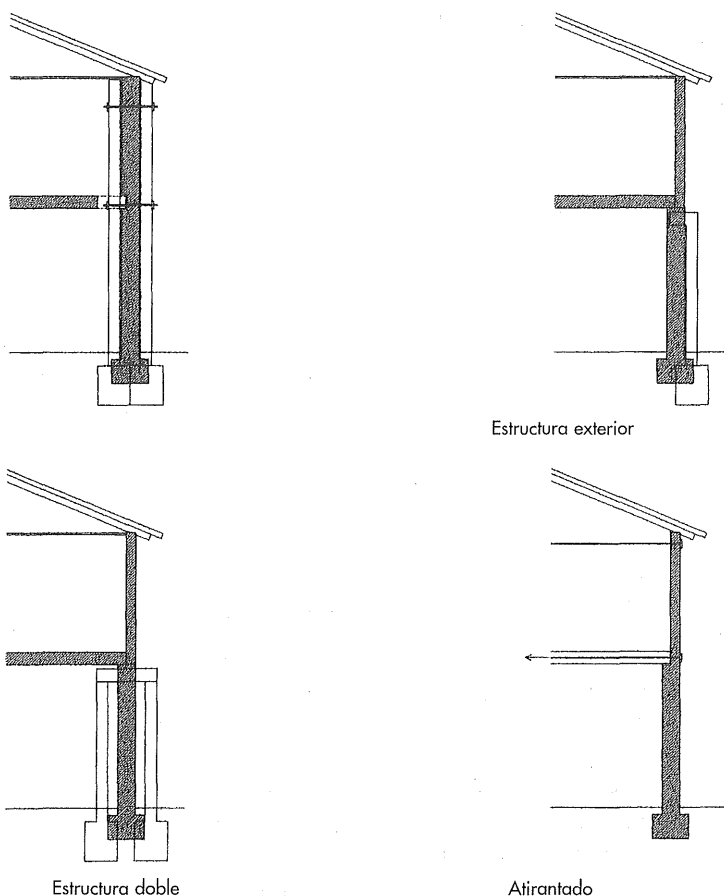


Fig. 3.15. Reparación de muros de carga con nueva estructura.

- **Estructura interior**, paralela al muro existente que contenga las cargas verticales en voladizo. Esta estructura podrá ser de muro de carga de fábrica o porticada de hormigón armado, metálico o de madera. En cualquiera de los casos, además de su correcto cálculo y cimentación deberá quedar claramente resuelto el apoyo de las cargas superiores, así como las incidencias funcionales en los locales interiores.
- **Estructura exterior**, similar a la anterior pero por fuera del muro afectado. Son válidas las mismas técnicas y materiales y resulta importante el cuidado estético además de la solución del apoyo de las cargas superiores.
- **Estructura doble** con agujas o puentes pasantes, útil cuando se trata de una solución provisional o cuando tenemos unas cargas muy importantes, con mucha sección del muro o, simplemente, con difícil

solución constructiva para su descarga. La solución técnica suele ser a base de pórticos de madera, acero u hormigón armado.

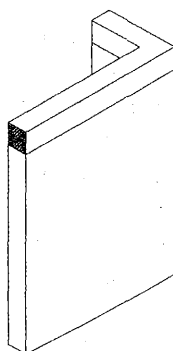
- **Atirantado**, mediante elementos metálicos colocados horizontalmente y en perpendicular al muro deformado, normalmente a la altura de su coronación. Estas varillas metálicas suelen quedar embutidas en la estructura horizontal y asoman su extremo al exterior donde se sujeta con piezas especiales que permiten transmitir los esfuerzos. Es una solución tradicional que suele dejar aparentes el extremo del propio anclaje para su mantenimiento y que aporta el peligro de corrosión de las piezas metálicas, por lo que se debe cuidar su protección antioxidante o bien utilizar materiales inoxidables, tanto metálicos como sintéticos.

B) Refuerzo

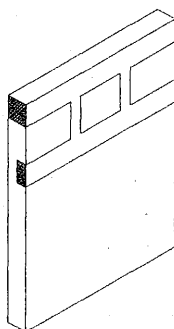
Podemos considerar básicamente tres tipos de refuerzo: apilastrado, zunchado y cosido. Cualquiera de ellos persigue dar al muro en cuestión una mayor capacidad portante, bien aumentando su inercia (apilastrado) bien mejorando su trabazón, lo que aumenta su resistencia a tracción (zunchado y cosido).

B.1) El apilastrado consiste en el adosado y conexión de pilastras vistas del mismo material que, con la adecuada cimentación, aumenta la inercia del elemento y lo hace más resistente a las posibles acciones horizontales que causaban el desplome. Resulta fundamental la continuidad constructiva entre muro y pilastras, lo que no siempre se puede conseguir, en función del tipo de material. Es prácticamente imposible en muros de tierra o en mamposterías de canto rodado, mientras que es más fácil en fábricas de

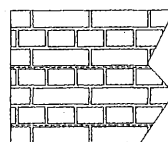
ZUNCHADO EN CORONACION



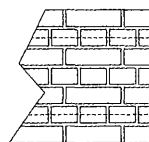
ZUNCHADO DOBLE



COSIDO EN TENDEL



COSIDO EN HILADA



COSIDO DE TAPIA INCLINADO

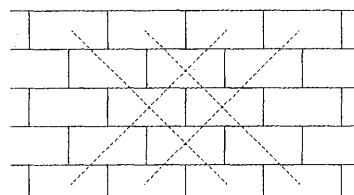


Fig. 3.16. Refuerzo de muros.

ladrillo, de sillería o de mampostería de sillarejo. No conviene confundirla con la solución descrita en los apartados de nueva estructura (pilastras interiores o exteriores) donde éstas constituían una estructura adosada de contención.

B.2) El zunchado consiste en la colocación o ejecución de un refuerzo lineal horizontal en el borde superior del muro, o en una línea intermedia, en función de las fuerzas a absorber. El zunchado puede realizarse con hormigón armado, acero o madera (laminada o no). Cualquiera de ellos puede ocultarse en el espesor del muro, lo que obliga a un cajeado, con posibilidad de dejarlo visto o de recubrirlo con chapado de la misma fábrica. Si el muro es muy largo, el zunchado puede ser doble y estar atado entre sí con elementos verticales. Si se trata de tramos de muro cortos o de pilastras, podemos recurrir a un zunchado mediante pletinas metálicas que constituyen unas abrazaderas o “bragas” (“briacas”) que sujetan el elemento constructivo y absorben los esfuerzos horizontales de tracción, sobre todo cuando la deformación ha derivado en grietas verticales que, en este caso de elementos pequeños, suponen un síntoma alarmante de agotamiento de la traba. En los casos en que se compruebe que la sección del elemento vertical portante afectado es insuficiente para la carga a sostener, estas abrazaderas horizontales se pueden conectar entre sí mediante perfiles angulares en las esquinas constituyendo una estructura suplementaria que recibe las cargas. Entonces debemos cuidar su “entrada en carga” para asegurar que la pilastra se queda sin trabajo.

Cabe incluir en este apartado los **atirantados** realizados con cables y barras metálicas exteriores que tratan de “precomprimir” el muro en horizontal y ayudar a absorber los esfuerzos que aparecen al superarse la traba del propio muro. Deben colocarse por ambos lados si se trata de un muro recto, para equilibrar las tensiones. En casos de muros curvos, puede pensarse en la colocación por un solo lateral, el convexo.

B.3) Cosido. Se trata de una técnica un tanto anómala desde el punto de vista de funcionamiento constructivo, ya que puede llegar a cambiar el trabajo mecánico del muro. En efecto, el muro de fábrica trabaja transmitiendo cargas verticales a través de sus elementos y asegurando su solidez gracias a la trabazón que da el aparejo. El cosido supone la introducción de unos elementos longitudinales metálicos que buscan la sujección de los mampuestos de la fábrica entre sí y que, por lo tanto, van a trabajar sólo a tracción, sustituyendo o complementando la misión de trabazón del aparejo. Sin embargo, según su disposición, pueden deformar la línea original de trabajo a compresión, sobre todo la del aparejo, provocando desplazamientos de piezas no correctos al estar unidas entre sí. Por ello

conviene distinguir dos tipos de cosidos, el inclinado y el horizontal.

En el inclinado, las varillas unen unas hiladas con otras, además de piezas adyacentes de la misma hilada. En el horizontal, las varillas se colocan preferentemente en el lecho entre hiladas o uniendo sólo piezas de la misma hilada.

A priori, podríamos afirmar que la variante más correcta es la horizontal que introduce el cosido en el tendel, ya que es la que, aparentemente, interfiere menos en el trabajo mecánico original de la propia fábrica. La siguiente sería la que sólo une piezas de una misma hilada, pero en este caso tenemos que asegurarnos que dejamos cosidas todas las piezas de una hilada (verdugada) aunque no hace falta coser todas las hiladas.

La solución que cose hiladas entre sí puede ser útil cuando necesitamos conferir al muro resistencia a tracción vertical en uno de los flancos, aunque tiene el inconveniente mencionado de tergiversar el trabajo de la fábrica en su conjunto como transmisor de cargas verticales. También puede ser válido para muros de tapia, al tratarse de una masa sin hiladas. En cada caso habrá que estudiar la solución más adecuada en función del tipo de deformación y de material constitutivo.

Por último, es importante considerar dos aspectos de procedimiento importantes. Por un lado, la incidencia del tamaño de los elementos de la fábrica, ya que cuanto más pequeños, más difícil resulta el cosido a no ser que lo limitemos a los tendeles; el caso extremo sería el tapial que resulta prácticamente imposible de coser. Por otro, el peligro de corrosión que aportan las varillas metálicas introducidas en la fábrica. Ello hace que sea necesario el uso de material inoxidable, bien acero, bien resinas de poliéster o poliamidas, o fibras minerales de vidrio o de carbono. En cualquier caso, se requieren un mortero de adherencia entre fábrica y cosido que dependerá del tipo de varilla y que debe ser inerte con respecto a la propia fábrica.

C) Demolición y sustitución

Cuando las actuaciones anteriores sean muy difíciles o muy costosas o, en cualquier caso, inútiles, no tendremos más remedio que recurrir a la demolición y sustitución por un nuevo muro. En este caso, el nuevo muro podrá hacerse de fábrica, igual al existente aunque con las dimensiones necesarias para su estabilidad, o de hormigón armado visto como una clara aportación actual a la obra.

Naturalmente, siempre cabe la solución mixta de muro resistente de hormigón armado con recubrimiento superficial de fábrica imitando la existente. No parece la actuación más sincera y, en cualquier caso, hay que

tener en cuenta que si la nueva fábrica es sólo de cerramiento, no está estabilizada por carga ante las posibles acciones exteriores, sobre todo las dilataciones y contracciones térmicas.

D) Saneado y reparación final

Una vez establecida la contención de las acciones exteriores que provocan la deformación, habremos asegurado la anulación de la causa por lo que podremos proceder, si cabe, a la reparación del efecto. Se trata en este caso, de un defecto de difícil corrección por lo general, toda vez que estamos ante deformaciones de muros de gran espesor cuyo “enderezamiento”, además de suponer unos esfuerzos importantes, obligaría a trabajar a la fábrica a unas tensiones laterales de tracción para las que no está preparada. Por ello, por lo general, una vez realizada la contención no se intenta desplazar el muro a su origen a menos que se trate de espesores pequeños, y la reparación del efecto se limita al saneado superficial de la fábrica como si de una erosión se tratase, tal como se estudia en los tratados de patología de fachadas.

3.1.2. Roturas

Nos referimos a las grietas, fisuras y desprendimientos que quedaron analizadas en el punto 2.3.2. Como vimos, aparecían como consecuencia de una acción exterior importante que, o bien provocaba una deformación exagerada que redundaba en roturas o bien producía directamente la rotura como consecuencia de la fragilidad del muro y su falta de conexión. También podían tener el origen en una variación dimensional periódica consecuencia de los cambios de temperatura atmosféricos.

A) Por acciones exteriores

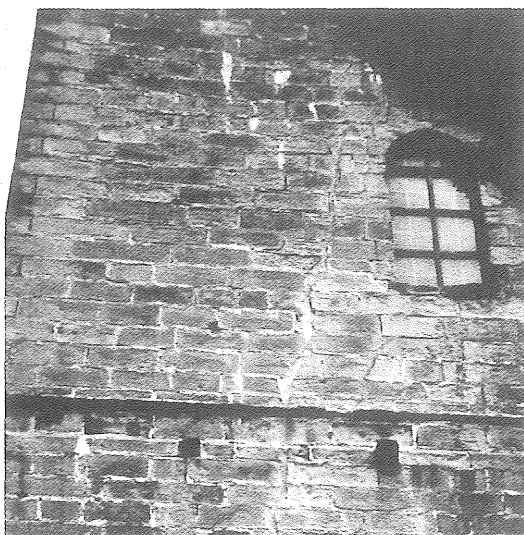
En el primer caso, las técnicas de intervención seguirán el mismo criterio que hemos expuesto en las deformaciones, es decir, contención previa de las acciones exteriores causantes del proceso patológico para anular el origen del mismo. En este sentido, podremos hablar también de las tres opciones planteadas, a saber:

- Nueva estructura
- Refuerzo/atirantado.
- Demolición y sustitución

y en cada una de ellas, las distintas variantes allí mencionadas

B) Por variaciones dimensionales

En estos casos la grieta nos está indicando la necesidad de una junta de dilatación por lo que la mejor intervención será la que plantee la existen-



3.11. Grieta estabilizada y sellada en un muro de sillería.

cia de dicha junta. En efecto, por una parte, si el muro rompe nos está indicando que su longitud era excesiva para el gradiente higrotérmico que sufre y que, probablemente seguirá sufriendo, por lo que se mantendría presente la necesidad de dicha junta. Por otra, una vez roto ya no tenemos un sólo elemento constructivo, sino dos, que sufrirán dilataciones y contracciones de un modo independiente, por lo que por muy bien que intentemos eliminar la grieta, más tarde o más temprano volverá a aparecer.

Como consecuencia se nos presentan dos posibles actuaciones. Por un lado, sellar la grieta por ambos lados del muro con material elastómero que obstruya el paso de aire o agua y que permita mantener la movilidad de los dos muros resultantes. Por otro, la apertura de una junta de dilatación rehaciendo toda la zona del muro afectada a base de reponer las piezas rotas una a una, manteniendo dicha junta estéticamente aceptable y con el tratamiento superficial adecuado a su misión (sellado, perfil metálico, etc).

La primera solución la usaremos sobre todo en casos de sillerías o fábricas históricas de complicada intervención o en los casos en que no dispongamos de presupuesto suficiente. La segunda, siempre que la situación lo permita y queramos dejar el muro con el mejor acabado.

C) Derrumbamientos

Como ya se vió en el apartado 2.3.2- C, sus causas eran dobles; cohesión deficiente y esfuerzo superior a la capacidad del muro que lo sufre. En cuanto a la segunda (esfuerzo) la intervención seguirá los cri-

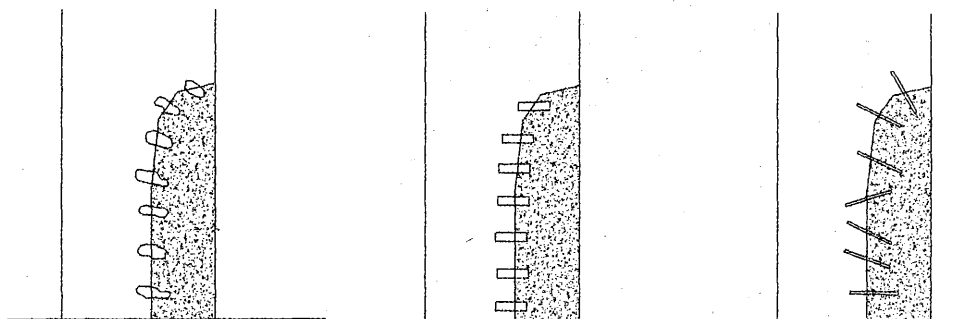


Fig. 3.17. Reparación de derrumbamiento.

terios y las soluciones apuntadas en los apartados anteriores, tendentes a desviar la acción que provoca los procesos patológicos, absorbiéndola, mediante estructuras adicionales o refuerzos del propio muro afectado. Con respecto a la deficiente cohesión de la fábrica, además de reponer la masa desprendida como veremos más adelante, tendremos que procurar una mejora de dicha cohesión. Para ello podremos seguir varias técnicas en función del tipo de fábrica de que se trate.

Para **fábricas de sillería** y de elementos grandes en general, la solución más adecuada será un cosido (o microcosido, según el tamaño del mampuesto) en horizontal, tal como quedó indicado en el apartado 3.1.1 B.3.

Para **mamposterías** de canto rodado, se hace necesario un saneamiento profundo de las uniones de mortero antiguo y un rellenchido de nuevo mortero, o de lechada, introducido desde el exterior, incluso con posibles inyecciones de mortero si se detectan grandes espacios vacíos en su interior, bien por simple inspección ocular, bien mediante ultrasonidos. Dichas inyecciones suponen la realización previa de perforaciones que alcancen esos huecos y posterior saneado de los mismos a base de aire a presión, incluso agua, antes de inyectar el mortero de rellenchido.

Para **fábricas de ladrillo y adobe**, se puede proceder a cosidos en tendeles, tanto a lo largo como a lo ancho, además de saneado y rellenchido del mortero de los mismos de un modo similar al mencionado en el punto anterior.

Para **muros de tapia**, los más afectados por esta lesión, la solución es algo más compleja. Podemos acudir también al cosido, aunque en este caso no tengamos hiladas propiamente dichas y, por tanto, la dirección del cosido no está tan clara. Estableceremos líneas transversales sobre todo, y con cierta triangulación longitudinal, aunque aquí no es muy recomendable usar varillas metálicas, sino de fibra de poliéster e, incluso, simplemente de mortero como líneas internas de trabazón.

También conviene “auscultar” el muro para detectar posibles “cavernas” en el interior, que se podrían rehenchir con morteros de terracemento o tierra-cal, de composición adecuada en función de la de la tapia a intervenir, incluso lechadas diluídas de cal al 10%.

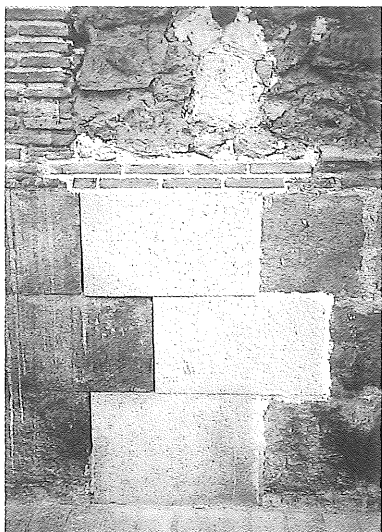
Por último, se están estudiando alternativas con inyección de productos consolidantes que, a la vez que permiten mejorar la cohesión interna, facilitan la hidrofugación en masa de los muros, necesaria sobre todo en caso de humedades de capilaridad. Conviene esperar a conocer los resultados de estos estudios, o realizar estudios previos, antes de llevar a cabo intervenciones con esos materiales.

D) Reparación del efecto

Al contrario de lo apuntado en 3.1.1 D, al hablar de la dificultad de la reparación de las deformaciones y su posible inutilidad, ahora nos encontramos con lesiones muy concretas que sí exigen una determinada reparación, siempre que hayamos anulado la causa que las originaba.

En cuanto a las grietas, podremos seguir los dos caminos apuntados al hablar de dilataciones y contracciones, es decir, bien un sellado por ambas caras con elastómeros después de un conveniente saneado y limpieza de los labios de la grieta, dejando dicha grieta como referencia histórico-constructiva del muro afectado (foto 3.11), bien una reposición de todos los elementos rotos, uno a uno, casi como una operación quirúrgica (foto 3.12). El elemento a reponer lo debe ser en su totalidad, a menos que se trate de muros de gran espesor ($>1\ 1/2$ pies) con dificultad de acceso por su cara posterior. Entonces podríamos recurrir a reponer sólo una hoja superficial de, por lo menos, 1 pie de espesor o similar para darle consistencia suficiente al nuevo muro. Si se trata de una grieta por acciones exteriores, queda “desaparecida”; si es por dilataciones y contracciones, se debe abrir de nuevo, ahora en forma de junta de dilatación.

Naturalmente, la reposición de elementos alrededor de la grieta debe asegurar el aparejo de los mismos con el resto de la fábrica y su iden-



3.12. Sustitución de ladrillos dañados y nuevo chapado de sillares.



3.13. Reparación de esquinas y coronación de muros de tapia de con "suelo cemento".

tividad de características fisicoquímicas, con el objeto de que la zona reparada no suponga un punto débil en el nuevo muro.

En el caso de los derrumbamientos será importante reponer todo el volumen desprendido hasta alcanzar la forma original del muro. Para ello deberemos proceder a recuperar el máximo número de elementos de la fábrica original que están en buenas condiciones, así como localizar o fabricar los complementarios con las mismas características fisicoquímicas. Emplearemos también morteros similares a los originales, normalmente con cal para asegurar su plasticidad y acaso algún componente expansivo para conseguir su adherencia por contacto. En la mayoría de los casos, además, podrá ser útil colocar varillas de conexión en las juntas como si de un cosido puntual se tratase, pero no suele ser recomendable el uso de morteros con resinas epoxi por la rigidez puntual que éstas pueden aportar.

Un caso particular de esta lesión es el de los tapiales, que presentan una difícil unión entre la parte que permanece y la que se aporta. Entonces, además de un profundo saneado de la superficie a tratar para eliminar todos los restos meteorizados o poco cohesionados, deberemos practicar mechinales distribuidos uniformemente, bien para que en ellos penetre parte de la nueva mezcla de tapia, bien para colocar elementos de conexión rígidos (varillas, ladrillos, adobes, mampuestos, etc) suficientemente encastrados para que no se muevan al intervenir. A continuación iremos ejecutando un nuevo tapial con tongadas sucesivas de

unos 20 ó 30 cm de altura, con el correspondiente encofrado (tapial) por el exterior.

En cualquier caso, un aspecto importante es el tipo de mezcla a utilizar. Para ello, deberemos analizar previamente la granulometría y características químicas de la tapia anterior y lograr una mezcla lo más similar posible con tierras del mismo origen, reforzadas, si cabe, con lechada de cal cual si de una tapia real se tratase, o incluso, de cemento.

En algunos casos podremos pensar en variar la composición granulométrica e introducir elementos pétreos de mayor tamaño, incluso ladrillos, como si hiciéramos una tapia valenciana, con el objeto de reforzar la cohesión de la nueva aportación.

En cualquiera de los casos, deberemos proceder finalmente a la reposición del acabado exterior, continuo o por elementos, similar al existente, para lo que remitimos a los tratados correspondientes.

3.2. ARCOS

En el punto 3.1.2 hemos distinguido dos tipos básicos, de aligeramiento y estructurales, y a ambos nos referimos al estudiar sus posibles lesiones y ahora las técnicas de intervención.

Pueden sufrir asimismo los dos tipos de procesos patológicos mecánicos enunciados (deformaciones y roturas) aunque limitados en variaciones al ser el arco un elemento lineal muy concreto. Por ello convendrá plantear las técnicas siguiendo esa secuencia, al igual que hicimos con los muros.

3.2.1. Reparación de deformaciones

Según vimos en el apartado 2.3.1, las deformaciones que afectaban a los arcos lo hacían a su línea directriz, de tal forma que ésta perdía su geometría inicial haciendo que se perdiera también la continuidad en la transmisión de empujes entre dovelas y, por tanto, apareciendo el peligro de colapso por hundimiento. En consecuencia, la reparación de ese tipo de deformaciones deberá buscar la recuperación de la continuidad de esa transmisión de cargas o, si no se ha perdido del todo, por lo menos la contención del avance de la deformación con el fin de mantener la transmisión dentro de los márgenes admisibles (dentro del núcleo central de inercia)

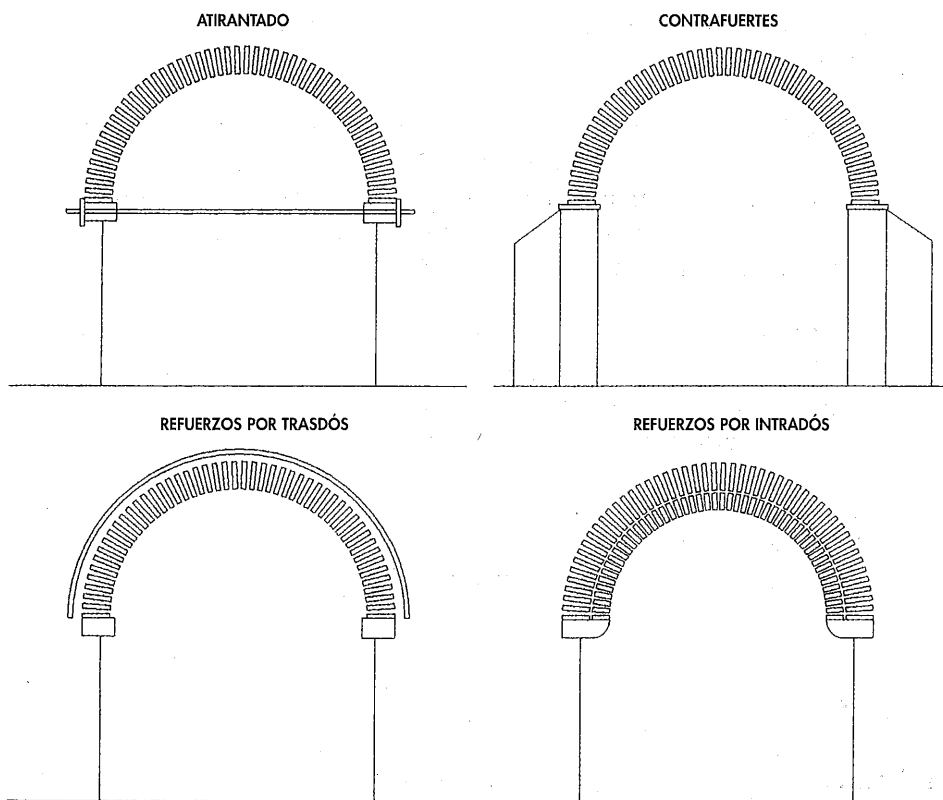


Fig. 3.18. Reparación de deformaciones de arco.

Nos encontramos, pues, con dos tipos de casos y, por tanto, dos posibles tipos de intervenciones.

A) Contención

Si la deformación es inicial, o no se ha perdido la línea de transmisión de cargas, podremos proceder a contener el avance de la misma, para lo que tendremos que analizar previamente la línea teórica inicial de transmisión de cargas (antifunicular de cargas) así como la línea actual una vez iniciada la deformación.

Una vez conocidos esos datos, y con la seguridad de que el conjunto estructural puede asumir la deformación producida sin peligro de colapso, podremos contener la deformación de varias formas en función del tipo de arco, de su forma y de la solución estructural y constructiva del conjunto. Podemos mencionar las siguientes soluciones como más representativas.

A.1) Atirantamiento, a base de atar entre sí los arranques opuestos del arco para absorber los empujes horizontales que éste provoca. Se trata de una solución aparente de ejecución relativamente sencilla, con un nuevo elemento constructivo que introducimos y que puede ser de diversos materiales, siempre que absorba esfuerzos de tracción (piedra, madera, metal) aunque lo más corriente es utilizar barras de acero ancladas a las dovelas salmer, o a los capiteles o canes de arranque.

A.2) Contrafuertes, a ambos lados del arco o a un sólo lado si es más débil y la deformación es mayor en su sentido. Suele ser corriente en los arcos localizados en el extremo de un paño o aquellos apoyados sobre columnas y relativamente aislados. El contrafuerte se puede realizar de diversos materiales en función de la obra afectada, de su carácter histórico, de los materiales originales y, por supuesto, del resultado formal. En ocasiones se puede recurrir a una simple ampliación de las columnas de apoyo.

A.3) Refuerzo. En caso de no poder introducir ninguna de las dos soluciones anteriores por dificultades constructivas y si, además, se comprueba que la carga que recibe en su estado inicial es excesiva, se puede recurrir a un refuerzo del conjunto de dovelas del propio arco teniendo en cuenta que podríamos llegar a cambiar el sistema de transmisión de cargas en el mismo. Podemos actuar por el trasdós, por el intradós o por las mismas dovelas.

- Refuerzo por trasdós. Se trata de introducir un nuevo arco por encima del actual y unido al mismo para asegurar su capacidad estructural. Dicho refuerzo se puede realizar:

- Con un palastro metálico introducido en el tendel del trasdós y con posibles conectores en las juntas.
- Con un arco de hormigón armado, previo rebaje de la fábrica que apoya en el arco. También se pueden considerar conectores en las juntas para asegurar el trabajo conjunto.

Aunque ambas soluciones son constructivamente “traumáticas”, la segunda (h.a.) implica mayor destrozo de la fábrica inicial y mayor dificultad en su ocultación o simple encaje formal.

- Refuerzo por intradós. La misma operación anterior se puede llevar a cabo por el intradós del arco con una actuación más sencilla aunque claramente aparente. En este caso los materiales más adecuados serían:

- Palastro metálico.
- Nuevas dovelas del mismo material, lo que probablemente obligue a aumentar la sección de los apoyos hacia el interior.
- Hormigón armado, sólo en casos muy especiales.



3.12. Tirantes metálicos para estabilización de arcos.

En estas soluciones no parece necesario introducir conectores entre el nuevo arco y las dovelas del antiguo y, por supuesto, no suele conseguirse un trabajo conjunto sino, simplemente una sujección del deformado para evitar su colapso.

- Refuerzo en dovelas. Se trata de dificultar el deslizamiento de unas sobre otras en las juntas para asegurar que la transmisión de cargas no sale del núcleo central. Para ello se puede proceder a introducir conectores entre dovelas que aumenten su traba pero no las rigidicen entre sí para poder seguir trabajando sólo a compresión. Los conectores más utilizados son los metálicos (inoxidables) o de la misma piedra del arco original, y deben localizarse lo más al centro posible del espesor o, de lo contrario, colocar uno en cada cara. Se trata, en definitiva, de un “cosido en articulación” entre dovelas que implica, en cualquier caso, la comprobación de que no va a haber movimiento de los apoyos del arco en su arranque, de lo contrario el refuerzo no serviría para nada.

B) Sustitución global

Si la deformación del arco es tan importante que no podemos asegurar la transmisión de cargas dentro de su trazado, no tendremos más remedio que

proceder a su sustitución. Para ello habrá que seguir, por lo menos, los siguientes pasos:

- Apeo de la parte de fábrica y estructura que carga sobre el arco en cuestión.
- Desmontaje de todas las piezas, procediendo a una numeración e identificación previas y a su manipulación individual.
- Tratamiento de consolidación de las distintas dovelas aprovechando su desmontaje, con los diversos procedimientos indicados para evitar su erosión y reponer su masa perdida.
- Posible sustitución de las piezas más afectadas por rotura o erosión, utilizando, bien nuevas piezas del mismo material original, bien piezas de materiales artificiales claramente diferenciadas de las antiguas.
- Reposición del conjunto buscando su geometría inicial y utilizando morteros adecuados, tanto por su exposición a la intemperie como por su posible incidencia fisicoquímica con las dovelas. En este sentido, suelen ser recomendables morteros plásticos a base de cal y bastardos.
- Puesta en carga del arco ya reformado mediante el uso de morteros expansivos en los tendeles de unión con el resto de la fábrica.

En definitiva, se trata de un proceso completo de anastilosis que nos permitirá mantener el elemento constructivo en su forma y función originales.

C) Sustitución puntual

Puede darse el caso de que se haya producido la rotura o aplastamiento de una sola de las dovelas del arco o, cuando hay columnas, una pieza de la misma, ya sea en el capitel, ya en el fuste, ya en la basa, debido, bien a la concentración de esfuerzos, bien a la debilidad de la pieza en cuestión (defecto de cantera) o bien a una erosión física o química especial. Entonces la actuación podrá consistir en la sustitución puntual de dicha pieza, sobre todo si no ha llegado a haber deformación del conjunto.

Para ello, necesitaremos proceder a un apeo de las cargas que descansan en el arco, así como un apeo del mismo mediante cimbra. A continuación sustituiremos la pieza por otra de similares características y, a ser posible, de la misma cantera. Por último, procederemos a la nueva entrada en carga del arco, lo cual debe estar previsto en el sistema de apeo que se diseñe.

3.2.2. Reparación de roturas

Las roturas posibles en los arcos son básicamente grietas que normalmente aparecen en las juntas entre dovelas por excesiva deformación según vimos en 2.3.2 A. La intervención implicará, en primer lugar, una comprobación de su movimiento

mediante la instrumentación adecuada y su seguimiento con la ayuda de extensómetros y comparadores.

A partir de ahí y determinada la causa de la deformación que produce la rotura, deberemos utilizar alguna de las técnicas vistas para las deformaciones, ya sea contención (atirantamiento, contrafuerte o refuerzo) o, en su caso, sustitución global.

En los casos de contención, una vez realizada ésta deberemos seguir comprobando la movilidad de la grieta a lo largo de un tiempo prudencial para asegurarnos de que hemos contenido la deformación.

3.2.3. Reparación del efecto

En los casos de arcos, no suele tener sentido la reparación de los efectos de la lesión como intervención adicional a la eliminación de la causa.

En efecto, si se trata de una deformación y procedemos a su contención, significa que a pesar de la misma el arco seguía cumpliendo su función estructural por lo que, desde el punto de vista constructivo, no resulta necesaria la recuperación de la forma original. Por otro lado, dicha recuperación supondría una operación mecánica tan complicada que no suele tener sentido económico ni funcional. Por el contrario, en los casos en que la deformación suponga peligro para la estabilidad del elemento, la actuación propuesta es la de sustitución global, con lo que queda reparado el efecto al mismo tiempo.

En cuanto a las grietas, una vez estabilizada la deformación que las produce, se pueden rellenar mediante la inyección de morteros plásticos que le den continuidad al conjunto.

3.3. BÓVEDAS

Consideramos, tanto las bóvedas de directriz longitudinal (cañón y arista) con distintas curvas generatrices, como las cúpulas. Por otra parte, al igual que en los arcos, consideraremos los dos tipos de lesiones mecánicas analizadas, deformaciones y roturas, tratando de anular primero la causa y reparar después la lesión.

3.3.1. Reparación de deformaciones

Como quiera que una bóveda se puede llegar a considerar como una sucesión de arcos paralelos, las intervenciones serán muy parecidas a las planteadas en el punto anterior. En efecto, en función del alcance de la deformación y de la estabilidad que resulte del cálculo de las líneas antifuniculares de carga, procederemos a la contención de los esfuerzos que provocan la deformación o a la demolición y sustitución de la bóveda.

No obstante, cabe puntualizar algunas diferencias en la función constructiva de arcos y bóvedas a la hora de analizar su situación estática así como los tipos de bóvedas más corrientes. Por un lado, el arco puede recibir cargas superiores de la obra de fábrica que sustenta, mientras que la bóveda, por lo general, sólo se sustenta a sí misma. Por otro, las bóvedas suelen ofrecer luces mayores que los arcos, por lo que su deformación puede acarrear mas fácilmente el colapso. Por último, es importante distinguir entre bóvedas continuas y bóvedas de arcos y plementería. En las primeras actuaremos en el conjunto, mientras que en las segundas debemos hacerlo sobre todo en los arcos que lo sostienen y, en todo caso, en la plementería. Veamos las técnicas más representativas:

A) Técnicas de contención

Se trata de absorber los esfuerzos horizontales que aparecen en los arranques y que tiende a separarlos. De nuevo consideramos tres técnicas:

A.1) Contrafuertes, colocados por el exterior, buscando los puntos de concentración de esfuerzos, si cabe. Si se trata de una bóveda continua, podemos incluso realizar un nuevo muro paralelo al original, trabado con el mismo. Si estamos ante bóvedas de arcos y plementerías, los contrafuertes coincidirán con el arranque de los arcos.

Las técnicas y materiales a emplear pueden ser múltiples, desde los de la misma fábrica en forma de machones o incluso arbotantes, hasta estructuras adosadas de madera, hormigón o acero, buscando una expresividad formal y funcional adecuada con el conjunto.

A.2) Atirantado, mediante elementos lineales capaces de absorber tracciones, sobre todo acero y madera.

De nuevo, si la bóveda es continua, la disposición de los tirantes será uniforme a lo largo de la directriz, y si es de arcos y plementería, deberán situarse en las bases de aquellos.

Cabe también la posibilidad de colocar los tirantes “cruzados” con el objeto de arriostrar el conjunto si se ve la necesidad de ello o en los casos de bóvedas con arcos de refuerzo también cruzados.

La solución deberá considerar, en cualquier caso, el reparto de los esfuerzos de reacción de los anclajes del tirante sobre la fábrica de apoyo de la bóveda con objeto de evitar posibles punzonamientos peligrosos para la estabilidad de la fábrica, para lo cual cabe considerar la posibilidad de introducir alguna estructura horizontal de reparto atando las cabezas de los tirantes.

A.3) Refuerzo, de la propia bóveda, que puede introducirse por trasdós o por intradós. Se trata ahora de las bóvedas continuas o de las plementerías de las bóvedas de arcos. Consiste en la ejecución de una nueva bóveda que sujete a la existente, bien por cuelgue (trasdós) o por apoyo (intradós).

En la primera, podemos considerar dos tipos de soluciones: una “dura”, en la que se construye una “cáscara” de hormigón armado utilizando la bóveda existente como encofrado perdido y asegurando su apoyo sobre los arranques, además de su sección y armado por cálculo. Es una intervención no reversible por lo que tiene muchas críticas, sobre todo en edificios de carácter monumental, por lo que su uso se deberá restringir a casos especiales, bien sin ningún valor histórico determinado o cuando no exista otra alternativa técnica.

Una alternativa más aceptable, aunque más complicada, consistiría en algún tipo de malla rígida a base de redondos o perfiles metálicos cruzados o, incluso arcos y codales de madera laminada, desde la que se podría colgar las piezas que constituyen la bóveda en el caso de que sean fáciles de identificar (dovelas de piedra) mediante anclajes metálicos individuales. Si la plementería es de ladrillo o piezas pequeñas, se podría recurrir a adherir a su trasdós una malla fina (poliester o fibra de vidrio) con algún tipo de resina inerte, que estaría colgada de la malla resistente.

Cualquiera de estas soluciones implica la limpieza del trasdós de las bóvedas, muchas de las cuales suelen contener un relleno de material suelto que sirve para estabilizar los arranques, por lo que se deberían tomar las precauciones necesarias, siempre con un apeo provisional de la bóveda mediante cimbras.

La solución “blanda” podría consistir en la aplicación exclusivamente de esa malla fina de poliester o fibra de vidrio o incluso metálica, adherida con resinas, que se limita a mantener unidas las piezas de la plementería y a absorber parcialmente posibles tracciones en la zona de riñones.

A.4) Zunchado de cúpulas, para sustituir los tirantes transversales por un anillo que trabajaría a tracción. Es el caso más claro y corriente de intervención y los materiales pueden ir desde la madera, cuidando sus uniones para absorber tracciones, pasando por perfiles metálicos como solución más corriente, hasta el hormigón armado para casos más drásticos o donde la no irreversibilidad no sea problema dado el tipo de edificio. Esta solución es útil, tanto para bóvedas reforzadas por arcos como continuas, y tanto para circulares o poligonales, con o sin pechinas, como cuadradas, así sean de arista o de cañón.

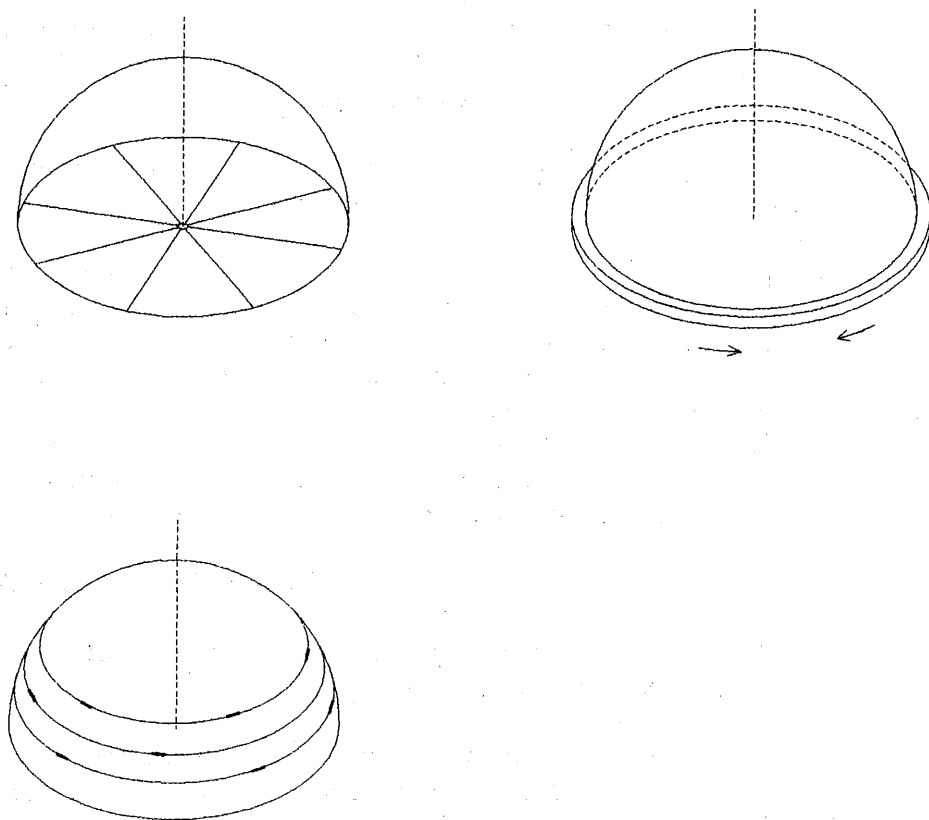


Fig. 3.19. Zunchado de cúpulas.

B) Demolición y reposición

Al igual que los arcos, cuando el estado de la bóveda sea ruinoso se debería proceder a su demolición, esta vez sin el problema de los arcos de mantener la parte de obra que soportaban. Una vez demolida total o parcialmente, consideraremos dos opciones. Reconstrucción, aprovechando las piezas originales y reponiendo las ausentes, o sustitución por una nueva bóveda aportando incluso soluciones más actuales. Si optamos por la reconstrucción, deberemos seguir los pasos indicados para arcos en 3.2.1 B, como si de una anastilosis se tratara (apeo, desmontaje, tratamiento de consolidación si cabe, montaje y puesta en carga) con la necesaria aportación de piezas nuevas que, preferentemente, deben ser de iguales características fisicoquímicas.

C) Reparación de la lesión

La intervención en las bóvedas tiene características similares a la de los arcos en lo que se refiere a la reparación de las deformaciones, ya que la recuperación de la geometría inicial resulta prácticamente imposible. Sin embargo, se diferencia de aquellos en lo que se refiere a grietas.

En efecto, las grietas en bóvedas tienen una continuidad lineal que las hace muy aparentes y requiere, por tanto, una actuación específica que conviene analizar.

C.1) Si se trata de **grietas o fisuras longitudinales** por el intradós como consecuencia de la deformación, bien sean en clave, bien en riñones, una vez anulada la causa mediante la contención por alguna de las técnicas indicadas, comprobaremos su estabilidad dimensional mediante la oportuna instrumentación y seguimiento.

Confirmada su estabilidad (variaciones higrotérmicas exclusivamente) podemos proceder a su reparación que consistirá en dos tipos de operaciones:

- Relleno de las grietas en las juntas entre piezas mediante inyección de morteros plásticos.
- Sustitución de las piezas rotas por otras de las mismas características fisicoquímicas, por lo menos en un espesor de unos 10 cms.

Todo ello, tanto si las dovelas quedan vistas como si el intradós está revocado. En cualquier caso, no se debe recurrir nunca a vendas ni enfoscados y revocos sin antes haber realizado esas operaciones anteriores.

Para las grietas en el trasdós, basta con un relleno de mortero plástico.

C.2) Si se trata de **grietas transversales**, consideraremos si la causa es por asientos u otros esfuerzos mecánicos, o por el contrario son consecuencia de dilataciones y contracciones higrotérmicas. En el primer caso, deberemos proceder de modo similar al indicado anteriormente. En el segundo, por el contrario, deberemos introducir una junta de dilatación-contracción en la zona donde ha aparecido la grieta. Para ello, al igual que en muros, habrá que sanear los labios, reponer las piezas rotas y marcar la junta de forma estéticamente aceptable, sellándola con materiales elastómeros y asegurando su estanquidad al agua de lluvia por el trasdós. En caso de que la operación se presente muy traumática, y si resulta aceptable estéticamente, bastará con sanear los labios y sellar directamente la grieta por intradós y trasdós.

Capítulo 4

SISTEMAS ESTRUCTURALES DE MADERA

1. GENERALIDADES

La madera es, junto con la piedra y el barro cocido, el material de construcción más utilizado hasta que a finales del siglo XIX empezó a quedar desbancada como material estructural por el acero y el hormigón debido fundamentalmente a tres razones: su menor capacidad mecánica, su aparente falta de durabilidad y la peor garantía que ofrece frente a los segundos por la inexistencia de control en su proceso natural de fabricación, en el que no puede intervenir el hombre.

De la menor capacidad mecánica de la madera hay que decir que, a igualdad de peso, la madera tiene una capacidad resistente mayor que la del acero y mucho mayor que la del hormigón. De aquí que cualquier sustitución parcial de una estructura de madera por elementos de acero o de hormigón armado requiera un detenido estudio, ya que la desfavorable relación resistencia peso de éstos puede introducir en la estructura cargas permanentes para las cuales no estaba pensada.

Respecto de la falta de durabilidad de la madera hay que reconocer que es el único material vivo utilizado en construcción y, por tanto, está especialmente expuesto a degradaciones provocadas por agentes orgánicos e inorgánicos que no afectan a otros materiales. Desgraciadamente la escasez de madera y los sistemas de producción actuales hacen que los árboles de los que se obtiene sean cada vez más jóvenes y, por tanto, con mayor proporción de albura en su tronco, es decir, de una madera más blanda y menos resistente a los agentes que la atacan. Pero no hay que olvidar que el acero o el hormigón armado pueden sufrir a su vez graves deterioros si no se toman las medidas apropiadas y que, con tratamiento y mantenimiento adecuados, la madera puede mantener sus características durante tiempo como lo demuestran numerosos ejemplos del patrimonio artístico y arquitectónico.

En cuanto al menor control de calidad en el proceso de fabricación de la madera respecto de otros materiales, es algo que se ve reflejado en los coeficientes de seguridad que se aplican en el cálculo de estructuras de madera, muy superiores a los empleados en las estructuras de acero u hormigón y que provocan que en muchos casos los elementos de madera estén trabajando a tensiones hasta diez veces menores de lo que podría soportar. Este problema se resuelve con el desarrollo de la madera laminada, que puede considerarse casi como un nuevo material. En efecto, la buena calidad de los adhesivos actuales junto con la eliminación parcial o total de las faltas de homogeneidad de la madera, permite obtener un material más resistente que ofrece más garantías dado el control de calidad que permite su elaboración. Además permite superar el límite que en cuanto a tamaño de las piezas impone la dimensión del árbol, obteniendo unos elementos de dimensiones impensables en la madera tradicional y favoreciendo una mayor continuidad de la estructura.

2. ESTRUCTURA DE LA MADERA

La peculiar estructura interna de la madera es lo que la confiere unas propiedades y un comportamiento tan diferente de los de otros materiales estructurales.

Las células de la madera tienen forma tubular, con su interior hueco (lumen) por donde circula el agua y las sustancias nutritivas. Las paredes de estos tubos están formadas por varias capas de celulosa, hemicelulosa y lignina principalmente, además de las sustancias nutritivas que necesitan las células. La lignina es una sustancia con gran capacidad de resistencia a compresión y sin forma definida que actúa como “cementante” de la celulosa. Ésta, en cambio resiste fundamentalmente a tracción y forma cadenas que se enrollan helicoidalmente por las paredes del tubo “armando” y “zunchando” la lignina.

Las células y, consiguientemente los tubos que forman, se orientan mayoritariamente en dirección paralela al eje del tronco o rama y, en mucha menor medida, en dirección perpendicular al eje. Este es el hecho fundamental que determina las características anisótropas de la estructura tubular de la madera. El crecimiento del tronco se produce en anillos concéntricos desde la médula, en el eje del tronco, hacia el exterior. Los anillos formados durante el verano son menos porosos y, por tanto, más duros y resistentes y de una tonalidad más oscura que los que se han formado durante la primavera.

En una sección transversal del tronco se aprecian tres zonas claramente diferenciadas: la corteza, la albura y el duramen. La corteza, que está formada por células muertas, hace de piel y protección del árbol. La albura, que es la madera joven y blanda por donde circula el agua con las sustancias nutritivas. El duramen, formado también por

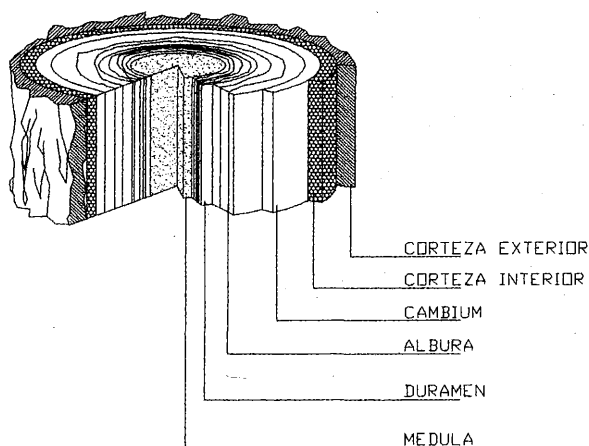


Fig. 4.1. Estructura de la madera.

células muertas, es la madera interior del árbol, más dura y resistente a las plagas de insectos y hongos.

3. ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS EN MADERA

3.1. CIMENTACIÓN

La cimentación con madera ha sido un sistema constructivo menos empleado que otros sistemas de cimentación como las zapatas, zanjias corridas, pozos rellenos con aglomerados de cal, hormigones ciclópeos, mampostería concertada, fábrica de ladrillo, etc. Aun así encontramos no pocos ejemplos de cimentaciones realizadas fundamentalmente con madera. Éstas han sido, por lo general, de tres tipos: zampeados, pilotajes o la combinación de ambos.

Los **zampeados** son cimentaciones superficiales y cuya misión es la de repartir cargas en terrenos flojos. Consisten en un emparrillado de madera más o menos denso formado por traveseros y largeros ensamblados y, si era necesario, prolongados y unidos en “rayo de Júpiter”, y apoyados en un lecho de grava. Este emparrillado constituía la solera para el arranque de soportes o muros de carga y se cubrían permitiendo la circulación del aire para que la ventilación impidiera que la posible humedad del suelo facilitara su pudrición.

Los **pilotes de madera** han sido utilizados frecuentemente desde tiempos prehistóricos hasta principios de nuestro siglo, bien para consolidar y mejorar el terre-

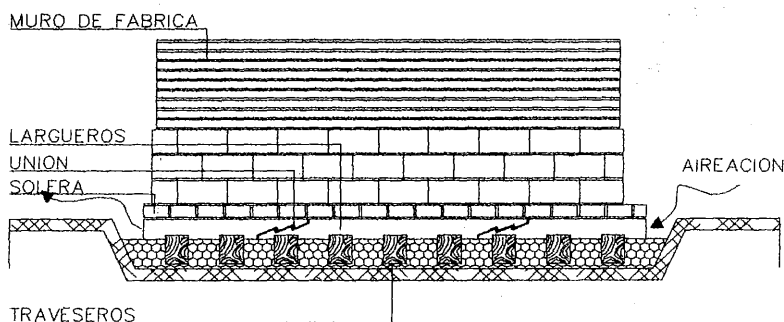


Fig. 4.2. Cimentación superficial en madera realizada mediante emparrillado zampeado.

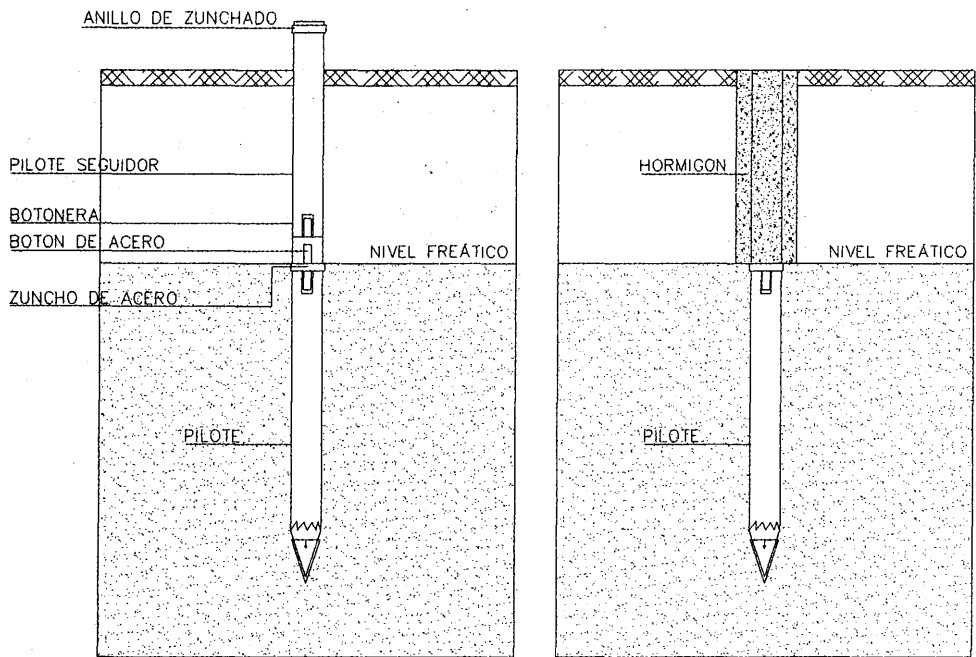


Fig. 4.3. Cimentación profunda realizada mediante pilotes de madera.

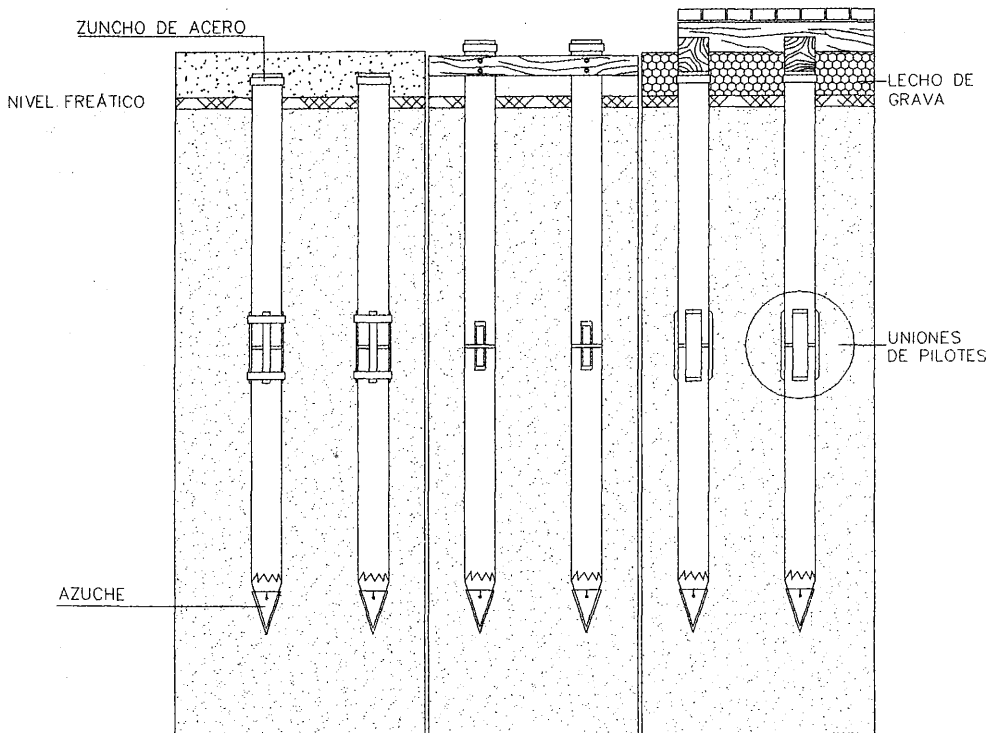


Fig. 4.4. Cimentación profunda tradicional mediante pilotes de madera y encepado superior.
a. Hormigón. b. Viga riostra. c. Emparrillado

no, bien como cimentación profunda para alcanzar estratos firmes en suelos poco consistentes como marismas, fondos de lagunas, bordes de ríos, costas, etc. Sirvan como ejemplo, desde los poblados lacustres y los palafitos prehistóricos hasta las ciudades de Venecia o Amsterdam, completamente cimentadas sobre pilotes de madera. Los pilotes se hincaban a golpes de maza, se les podía incorporar un azuche metálico en la punta y un anillo en la cabeza para zuncharla y protegerla de los golpes de la maza, y se podían empalmar uno a continuación de otro si la profundidad del estrato superaba la longitud del palo. Por último, una vez incados, se encepaban mediante vigas riostras, mediante un aglomerado de piedras y cal o mediante traveseros y largeros constituyendo un zampeado. El peligro de pudrición o de ataque de hongos o termitas que se produce al alternar situaciones de sequedad y humedad hace que los pilotajes de madera estén indicados sólo para cimentaciones que hayan de permanecer continuamente sumergidas.

3.2. FORJADOS

Los forjados y entramados han sido construidos tradicionalmente con madera al ser, hasta la aparición del acero estructural, el único material capaz de trabajar a flexión.

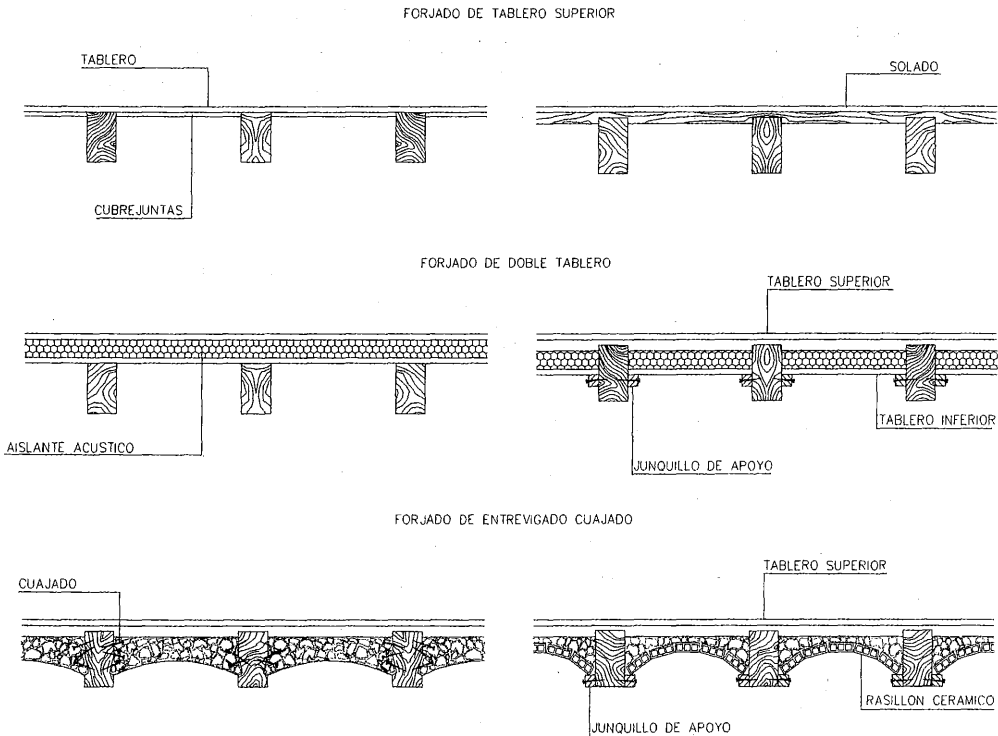


Fig. 4.5. Tipos de forjados de madera

Según la manera de rellenar el entrevigado podemos encontrar forjados de tablero superior, de doble tablero o de entrevigado cuajado. Los primeros son los más simples y están formados solamente por un tablero, que constituye o no el solado, apoyado directamente sobre las viguetas. Los segundos cuentan con dos tableros con un relleno de arena entre ellos para mejorar el aislamiento acústico. El tablero inferior podía apoyar sobre la cara superior de las viguetas o en sus laterales mediante junquillos. Los últimos mejoraban aún más el aislamiento y la protección contra el fuego rellenando todo el entrevigado con cascote y yeso. Estos, con el paso del tiempo y con el fin de aligerar el peso muerto que constituía el relleno (revoltón) fueron sustituyendo parte de él por piezas cerámicas (rasillas) formando arcos de descarga que son el precedente de las bovedillas actuales.

3.3. MUROS CON ENTRAMADO DE MADERA

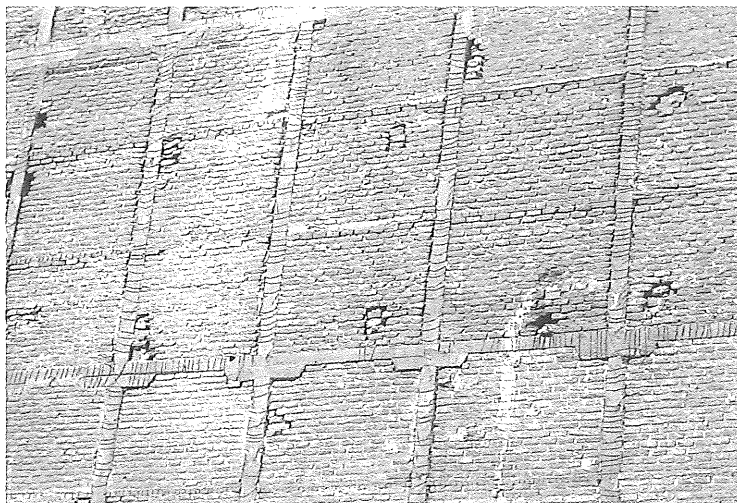
Uno de los usos tradicionales en la construcción consiste en la realización de muros estructurales armados (imprensa de madera) a base de pies derechos, carreras y codales y un relleno de los cuarteles libres (plementería) con fábrica de ladrillo, yesones, cascotes o adobes.

Este sistema cuya base nos la encontramos en arquitectura popular, se transfiere a los ámbitos urbanos tecnificándose y racionalizándose, permitiendo la construcción de edificios de más de cinco plantas de altura. El armado de madera resulta una estructura isostática por lo que se intenta rigidizar al máximo los nudos mediante zapatas o capiteles, ensambles a caja y espiga y clavos de forja, siendo necesario además el uso de la plementería como material de arriostramiento.

El comportamiento del conjunto (entramado y plementería) a lo largo del tiempo, así como los posibles procesos patológicos que pueda sufrir la madera terminan dando un carácter estructural a los rellenos formándose así una estructura mixta.

La naturaleza de este tipo de estructuras implica que el estudio de los daños y procesos patológicos que sufre la madera sea aplicable en estos casos. El proceso patológico más frecuente aparece en aquellos puntos donde existen filtraciones de aguas, pues generan las condiciones de humedad y temperatura necesarias para el desarrollo de los hongos de pudrición y de los insectos xilófagos. Estas zonas son:

- Fachadas exteriores y de patios.
- Cubiertas y cornisas.
- Zona baja de muros.
- Zona próxima a conducciones susceptibles de producir humedades de condensación, filtración o accidentales.
- Redes de suministro de agua.
- Redes de evacuación de agua.



4.1. Detalle de una estructura de entramado de madera con plementería de fábrica de ladrillo.



4.2. Forjado tradicional de madera con entrevigado de cascotes.

- Zonas húmedas de locales (cocina, baños, aseos, lavaderos, etc).

Este sistema constructivo de estructura vertical común en la mayoría de los centros históricos de nuestras ciudades utiliza la madera con gran profusión y se complementa con otro sistema de estructura horizontal que también se caracteriza por el uso masivo de la madera, como son los forjados de vigas y viguetas de madera con entrevigado cerámico o de relleno.

3.4. CUBIERTA

De los tres elementos que forman la cubierta, estructura, soporte de la cobertura y cobertura, los dos primeros han sido tradicionalmente contruidos con madera.

La estructura es el elemento resistente encargado de transmitir los esfuerzos provocados por las acciones exteriores y por el peso propio de la cubierta. Tradicionalmente, salvo en zonas secas con baja pluviosidad, se ha empleado la cubierta de “faldón estructural de alta pendiente” (según definición del profesor Galindo (E.T.S.A.M)), que es la que permite evacuar el agua con más rapidez. La estructura suele estar constituida con cerchas, cuchillos, arcos, muros de carga o vigas y pilares.

El soporte de la cobertura lo componen todos aquellos elementos que forman el plano inclinado sobre el que apoya el material de cobertura. Las cubiertas tradicionales se clasifican tipológicamente según esté constituido u organizado el soporte de la cobertura el cual, en muchas ocasiones, sobretodo en los tipos más sencillos, no se diferencia claramente o se confunde con la misma estructura. Los elementos que forman el soporte suelen ser los siguientes:

- **Pares:** madera escuadrada o en rollo colocados paralelos a la línea de máxima pendiente.
- **Correas:** elementos dispuestos perpendicularmente a los pares, más próximos entre sí y en mayor número.
- **Carreras:** se llama así a las correas cuando están muy separadas y sólo hay una o dos por faldón.
- **Parecillos, cabios o cabrios:** son palos paralelos a los pares pero de menos sección, menos separados, en mayor número y dispuestos sobre las correas.
- **Enlatado o enripiado:** es el plano continuo sobre el que apoya la cobertura. Suele estar formado por un entablado en el mejor de los casos, o por ripia o ramaje en edificios de menor calidad constructiva. A veces, sobre este plano continuo se disponen más elementos constructivos como rastreles, capa de mortero o incluso torta de barro para recibir el material de cobertura.

En cuanto a la terminología empleada en elementos de construcción tradicionales queremos aclarar que depende de dos factores fundamentales “lugar” y “tiempo” por lo que se pueden encontrar acepciones diferentes, a las aquí expresadas.

No todos estos elementos aparecen siempre en las cubiertas, ni conviene que lo hagan en todos los casos, sino que se combinan dando lugar a tipos más o menos complejos.

La cobertura está formada por los elementos encargados de garantizar la impermeabilización o la estanqueidad del conjunto. En construcciones primitivas o muy tos-

cas se empleaba paja, escobas o bordas, pero en la mayoría de los casos de cubiertas de alta pendiente se utiliza la teja.

3.5. CARPINTERÍA DE TALLER

Todos los elementos de carpintería así como solados y revestimientos, en muchas ocasiones, han sido tradicionalmente fabricados con madera dadas sus cualidades ambientales y la facilidad que ofrece a ser labrada. Aún hoy día sigue siendo así en gran parte, aunque en carpintería exterior la madera tiende a ser sustituida por materiales nuevos, como P.V.C. o aluminio, debido a motivos de conservación frente a las inclemencias de los agentes climáticos. Difícilmente ocurrirá esto en la carpintería interior ya que, siendo la situación ambiental la menos agresiva, no existen grandes razones para sustituir un material cuyo aspecto, tacto y calidez no es capaz de aportar, de momento, ningún otro.

4. DAÑOS EN LA MADERA

4.1. AGENTES ABIÓTICOS

Se pueden agrupar dentro de esta denominación todas aquellas causas que, sin tener relación alguna con la acción de seres vivos, contribuyen a la degradación de la madera o evitan que ésta se encuentre en buenas condiciones para mantener su capacidad resistente en una estructura.

4.1.1. Malformación

Cualquier tipo de anomalía debida al crecimiento del árbol a lo largo de su ciclo vital que evite que la estructura tubular de la madera se encuentre en óptimas condiciones, produce una disminución de la resistencia que tendría en caso de no haberse producido dicha malformación. El cometido de los coeficientes reductores de las tensiones de trabajo establecidas para cada tipo de madera es garantizar una resistencia mínima, y por tanto una seguridad en la estructura, a pesar de estas malformaciones naturales.

Las degradaciones producidas en la madera por malformación se denominan **degradaciones primarias**, mientras que las producidas en su manipulación o por agentes físicos u organismos vivos constituyen las llamadas **degradaciones secundarias**.

Entre la multitud de anomalías que pueden producirse en el crecimiento del árbol podemos citar, a modo de ejemplos, las acebolladuras, las fendas y las patas

FENDAS POR DESECACIÓN

PATAS DE GALLO

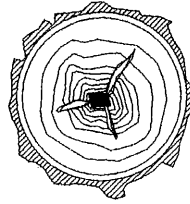
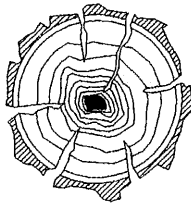
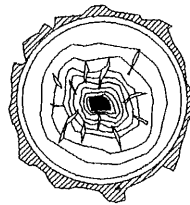
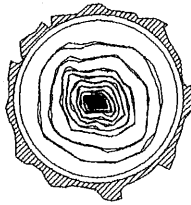
ACEBOLLADURAS
POR HELADASGRIETAS EN DURAMEN
POR DESECACIÓN

Fig. 4.6. Malformaciones de la madera.

de gallo, que son todas ellas diferentes tipos de fisuras en la madera, aparte de nudos, bolsas de resina, excentricidad de corazón, fibra torcida, fibra entrelazada, lupias y verrugas, madera de reacción, etc.

4.1.2. Fuego

Existe la generalizada y errónea creencia de que la madera es un material estructural inseguro en un incendio, debido seguramente a la confusión entre dos conceptos muy diferentes: la combustibilidad y la resistencia o comportamiento frente a la acción del fuego.

La combustibilidad de un material estructural tiene poco que ver con la idea de seguridad en un edificio, ya que ésta no implica que la estructura finalmente se consuma o no, sino salvar vidas humanas, y para esto sólo es necesario un intervalo de tiempo suficiente y unas condiciones ambientales que permitan a las personas que lo ocupan evacuar el inmueble. Teniendo en cuenta esto y que los incendios no comienzan por los elementos estructurales sino por los materiales contenidos en el edificio (por lo que no es posible la incombustibilidad absoluta), se puede comprender que la seguridad de los materiales en caso de incendio depende no de su combustibilidad sino de su resistencia al fuego, la cual se mide por el tiempo que tardan en perder alguna de las cuatro propiedades fundamentales: estabilidad mecánica bajo carga normal, estanquidad a las llamas, aislamiento térmico y no emisión de gases tóxicos o inflamables.

4.1.3. Cambios de humedad

El agua que contiene la madera está contenida o repartida en tres niveles diferentes. En primer lugar, la madera tiene agua de constitución, que es aquella que forma parte misma de las sustancias químicas del material y sin la cual la madera no sería madera. El contenido de **agua de constitución** no puede, por tanto, variar. En segundo lugar, encontramos **agua libre** en los huecos tubulares de las células, que se introduce en ellos por capilaridad o por inmersión de la madera. Este agua se elimina fácilmente por secado, ya sea natural o artificial, y su cantidad afecta al peso específico de la madera, pero no a sus propiedades volumétricas ni resistentes ya que simplemente está ocupando los huecos existentes en la misma estructura celular. Por último, tenemos el **agua de imbibición**, que es la que absorben las paredes celulares, incluso en forma de vapor de agua, debido a las propiedades higroscópicas de la celulosa. El contenido de este agua en la madera varía según la humedad del ambiente, y afecta sensiblemente a sus propiedades mecánicas y físicas, sobre todo a su volumen.

La madera tiende a mantener un equilibrio higroscópico con el ambiente en el que se encuentra. El aumento o disminución de volumen que se produce cuando varía el contenido de agua de imbibición al variar la humedad del ambiente, produce los fenómenos conocidos como hinchazón y merma. Gracias a la inercia que tiene la madera frente a cambios bruscos de humedad, los fenómenos de hinchazón y merma se ven amortiguados y se producen lentamente. A pesar de esto, si las variaciones de las condiciones higrotérmicas del ambiente son demasiado acusadas, las tensiones producidas entre las fibras de la madera al variar sus dimensiones volumétricas, pueden llegar a producir fendas.

4.1.4. Agentes climáticos

Aparte de los cambios de humedad que pueden ser consecuencia de las condiciones climáticas, otros factores climáticos importantes son la radiación solar y la lluvia.

Los rayos ultravioletas del sol atacan a la lignina, de manera que ésta se degrada y pierde sus características resistentes, lo que se identifica visualmente por un oscurecimiento de la madera (fotodegradación). Generalmente la acción del Sol se combina con la de la lluvia, que produce el deslavado de la madera, arrastrando la lignina y otras sustancias degradadas por la luz. Esto se caracteriza por las tonalidades claras y grisáceas que toma la madera y por las hendiduras o acanaladuras que se producen en la superficie (dientes de peine) debido a que los tejidos menos densos, crecidos durante la primavera, se degradan antes que los más densos que son los del verano.

La acción de la radiación solar sobre la madera hace recomendable en zonas de clima seco y soleado, como es el caso de la mayor parte de España, que la madera no quede vista al exterior, sino que se proteja con revocos u otros revestimientos. En cambio en zonas con clima húmedo, la fotodegradación es un fenómeno mucho menos acusado y es prioritario ventilar la madera para evitar su pudrición por humedad excesiva y constante. De aquí que la arquitectura tradicional y popular de los países del centro y norte de Europa y la zona cantábrica española se caracterice por los entramados vistos mientras que en la zona mediterránea, incluyendo las dos mesetas de nuestro país los entramados se protejan con revestimientos.

4.1.5. Otros agentes

Aparte de los daños ya mencionados, que son los más usuales, la madera puede sufrir daños de naturaleza mecánica, como exceso de solicitaciones o desgaste.

Las causas que pueden provocar unos esfuerzos excesivos para un elemento estructural de madera son múltiples y comunes con cualquier otro tipo de estructura: errores de proyecto (de concepto, de evaluación de cargas, de cálculo, de diseño) errores de ejecución, accidentes, falta de mantenimiento a lo largo de la vida útil del edificio, cambio de uso de todo o parte del edificio, modificación del funcionamiento estructural (por la construcción de nuevas plantas por encima de las existentes, por derribo de algunas partes del edificio, etc.).

Los excesos de solicitaciones pueden provocar, desde deformaciones incompatibles con el uso de la edificación hasta la rotura y colapso total o parcial. En este sentido la madera es un material de comportamiento excelente ya que “avisa”, es decir, admite grandes deformaciones antes de llegar al punto de rotura y produce ruido, ya que las fibras que la constituyen no se rompen de manera frágil y rápida, sino dúctil y progresivamente.



4.3. Rotura de vigas de madera laminada por exceso de carga.

El desgaste que puede sufrir la madera por abrasión, erosión, roce, etc, está muy relacionado con su dureza. Las maderas duras tienen un buen comportamiento en este sentido. Las que no son tan duras pueden requerir un tratamiento por impregnación o por barnices de resinas que refuercen su dureza.

4.2. AGENTES BIÓTICOS

Son todos aquellos seres vivos cuyo hábitat es la madera, o que se alimentan, sólo o en parte, de ella, atacándola y debilitándola. Conviene recordar que en muchos casos los daños de la madera no son causados por agente exclusivamente bióticos o exclusivamente abióticos sino por una combinación de ambos. Normalmente los agentes abióticos debilitan el material facilitando el ataque de los bióticos.

4.2.1. Hongos

Los hongos son organismos constituidos únicamente por filamentos denominados hifas. Los hongos necesitan unas condiciones ambientales básicas de humedad, temperatura y fuentes de sustancias alimenticias, sin las cuales no pueden desarrollarse.

Una humedad de la madera por debajo del 20% no permite su crecimiento ya que los hongos necesitan agua para desarrollar sus funciones, pero una humedad excesiva, cercana a la saturación de la madera, no les permite obtener el oxígeno que necesitan. De aquí que las maderas embebidas de forma continua en agua o en terreno saturado no sufran pudrición.

En cuanto a la temperatura, la ideal para un crecimiento acelerado es de unos 25°. Por debajo de 3° y por encima de 38°, para la mayoría de los hongos, no es posible su desarrollo.

Además, puesto que los hongos no son capaces de sintetizar sustancias nutrientes, no tienen más remedio que tomarlas de otros organismos, en este caso la madera, de los cuales se hacen parásitos. Por esto también requieren una cantidad mínima de sustancias de reserva en la madera que les sirve de soporte y una mayor o menor facilidad para obtenerlas. No todas las maderas son igual de vulnerables al ataque de los hongos.

Existen muchos tipos de hongos y se pueden agrupar, según los efectos que producen sobre la madera, en mohos, hongos cromógenos y hongos xilófagos.

- **Mohos:** son hongos incoloros que se desarrollan adosados a la madera, en sus cavidades celulares y en la superficie. Dado que se alimentan

sólo de materiales que encuentran en los huecos de la madera, no causan daño ni debilitamiento a su estructura celular (debido a la dureza de la celulosa y de la lignina, que componen las paredes celulares) por lo que no provocan disminución de la resistencia de la madera. Son, por tanto, inofensivos desde el punto de vista estructural.

- **Hongos cromógenos:** reciben el nombre de la pigmentación que caracteriza sus hifas y que provoca en la madera una coloración generalmente azulada, aunque también puede ser parda, rojiza, amarilla o verdosa. No son completamente inofensivos como los mohos pero, mientras el porcentaje de volumen de madera atacado no sea excesivo (inferior al 25%), no producen disminución apreciable de la capacidad resistente de la madera. Atacan tanto a frondosas como a coníferas.

- **Hongos xilófagos:** son especies de hongos más desarrolladas, cuyas hifas se agrupan formando un tejido algodonoso denominado micelio. Como los anteriores tipos, se desarrollan tanto en las cavidades interiores de la madera como en la superficie. Estos hongos son capaces de segregar sustancias que ablandan la celulosa y la lignina y les permite alimentarse de ellas provocando la descomposición bioquímica o pudrición de la madera. De aquí el origen griego de su nombre: xilófagos (xilos=madera, fago=que se alimenta de...). Su ataque hay que considerarlo peligroso para la seguridad de la estructura al provocar una reducción progresiva de la capacidad resistente de la madera hasta llegar a anularla. La identificación de hongos xilófagos como causa del deterioro de una madera es sencilla debido a los cambios de coloración, al olor a pudrición, al reblandecimiento de la consistencia y al agrietamiento de la madera, a la existencia de madera descompuesta y a la pérdida morfológica general.

Existen dos tipos principales de hongos, característicos por la coloración que provocan en la madera: Los **hongos de pudrición blanca o fibrosa**, que se alimentan de la lignina, dejando como residuo las fibras de celulosa, de color blanco o muy claro. Estos atacan sobretudo a las coníferas. Y los **hongos de pudrición parda o cúbica**, que atacan más a las maderas frondosas, especialmente a las tropicales, y que se alimentan, por el contrario, de la celulosa, dejando como residuo la lignina, de color pardo o rojizo. En una primera fase del ataque, la madera se agrieta y disgrega en fragmentos cúbicos (pudrición cúbica) para, finalmente, reblandecerse y reducirse a polvo. Además, dentro de los hongos de pudrición parda, encontramos dos tipos claramente diferenciados. Por un lado los de **pudrición seca**, que se pueden desarrollar con menos humedad, y, por otro, los de **pudrición húmeda**, que se desarrollan en maderas que conservan un grado de humedad muy elevado. Un caso particular y muy peligroso de estos últimos son los llamados **hongos de pudrición blanda**, que se desarrollan sola-

mente en el interior de la madera, atacando las paredes interiores de los vasos y produciendo un reblandecimiento de la estructura celular que sólo se aprecia cuando el ataque está muy avanzado.

4.2.2. Insectos

La presencia de insectos en la madera se caracteriza por las perforaciones que realizan en su interior. Existen muchas especies de insectos que viven de la madera o en la madera, pero no todas la perjudican en la misma medida. Según la actividad que desarrollan o el grado de agresividad del ataque que producen, estos insectos podrían agruparse en tres tipos diferentes:

4.2.2.1. Xilófagos

Son los que, como los hongos xilófagos, se alimentan de las sustancias nutritivas de la madera, y son, por tanto, los más perjudiciales.

Cabe distinguir dos tipos, según su origen y forma de ataque: coleópteros e isópteros.

En el caso de los **coleópteros** las hembras depositan los huevos en los fondos de la madera. Más tarde al crecer, las larvas practican galerías interiores paralelamente a la dirección de las fibras y los adultos generalmente abren orificios en la superficie para salir. La existencia o no de estos orificios de salida, su tamaño y su forma son



4.4. Detalle de daños por hongos de pudrición en pies derechos de madera. El hueco que se aprecia corresponde a la sección inicial de la escuadra de la madera.



4.5. Detalle de ataque por hongos de pudrición en pie derecho de madera. Se aprecia la destrucción total del elemento.

datos fundamentales para determinar qué especie de insecto los ha provocado. El ataque continuado de varias generaciones puede llegar a destruir completamente la madera. Los principales coleópteros son las polillas y la carcoma.

Las polillas atacan sólo a determinadas especies de frondosas que tienen vasos con diámetro mínimo de 0,07 mm y en condiciones de humedad baja. Es difícil detectar el ataque antes de que los adultos empiecen a practicar orificios en la superficie. Si la plaga no se elimina completamente, se reproduce en muy poco tiempo.

La carcoma ataca tanto a frondosas como a coníferas. El ataque es fácilmente detectable por estos orificios, por el serrín que expulsan a través de ellos y por el ruido que producen al “roer” la madera. Un ambiente seco es una medida de protección eficaz, ya que las larvas requieren una humedad superior al 60% para poder desarrollarse.

Los isópteros, termitas o termes, forman colonias muy similares a las de las hormigas. Su ataque es especialmente virulento y peligroso por la facilidad con que se desarrollan colonias nuevas a partir de pocos individuos, por su capacidad de atravesar materiales relativamente duros para llegar a la madera y, sobretudo, porque pasan desapercibidas debido a que no practican orificios en la superficie por la fobia que tienen a la luz. Esto último provoca que la plaga sea detectada normalmente cuando los daños son ya de cierta importancia o incluso irreversibles. Es importante saber que las termitas anidan en la tierra, con unas condiciones de temperatura y humedad moderadas y constantes y que siempre atacan a través de galerías subterráneas sin salir a la superficie, es decir, desde abajo, por lo que si se detecta su presencia en un edificio a determinada altura se puede tener la seguridad de que las plantas inferiores ya han sido infectadas. Un sencillo ensayo que permite comprobar la existencia de termitas en una madera consiste en presionar la superficie con un objeto punzante. Si el objeto se introduce con relativa facilidad es que el interior de la madera ya ha sido perforado aunque una delgada capa superficial permanezca intacta.

4.2.2.2. Parásitos

Son insectos que viven a costa de los xilófagos, generalmente de sus larvas, pero a veces también de los adultos. Su presencia no es peligrosa desde el punto de vista del ataque a la madera pero indica la existencia de una plaga de xilófagos que sí puede ser perjudicial.

4.2.2.3. Moradores

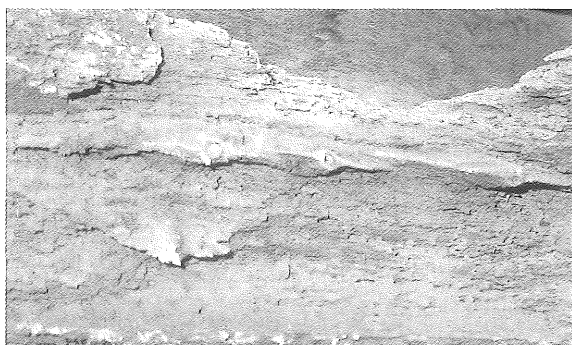
Se limitan a anidar en la madera, en sus huecos o recovecos, que pueden haber sido originados por descomposición o pudrición, o por la acción de xilófagos.



4.6. Daños en un entramado de madera por ataque de hongos de pudrición generados por filtraciones en la red de evacuación de aguas.



4.7. Detalle de un forjado dañado por hongos de pudrición generado por humedades accidentales de las redes de suministro donde se aprecian vigas de madera sanas y vigas de madera dañadas.



4.8. Detalle de daños por hongos de pudrición parda en vigas de madera.



4.9. Detalle de daños por hongos de pudrición cúbica en vigas de madera.

Su ataque no encierra gravedad, ya que no se alimentan de la madera, aunque puedan causar algún pequeño perjuicio al construir sus nidos.

4.2.3. Xilófagos marinos

Sólo afectan a la madera que está en contacto continuo con el agua de mar. Existen varias especies de moluscos y crustáceos que se alimentan de los componentes de la madera abriendo galerías en ella y, en consecuencia, disminuyendo su sección resistente. La gravedad de los daños depende, como en el caso de los hongos e insectos, de varios factores: la especie de madera, la especie de molusco o crustáceo atacante, las condiciones de temperatura, salinidad y contenido de materia orgánica del agua marina, etc. Aunque no pueden sobrevivir fuera del agua, si se reaprovecha madera que ha estado en contacto con ella para la estructura de un edificio, puede ser que ya haya sido afectada en mayor o menor medida.

4.2.4. Otros

Existen otros seres vivos, algunas especies de aves y de roedores, que atacan a la madera para buscar cobijo en su interior. Puesto que no atacan en forma de plagas, su eliminación no requiere tratamientos generales que afecten a todo o gran parte del edificio.

5. TRATAMIENTOS PREVENTIVOS DE LA MADERA

Los tratamientos preventivos son aquellos destinados a proteger la madera, que se lleven a cabo antes de su puesta en obra. Cualquier medida de prevención deberá considerar el grado de riesgo de degradación si quiere ser verdaderamente efectiva.

5.1. PREVENCIÓN

La prevención de la degradación de las estructuras leñosas es, si cabe, más conveniente aún que la de otros tipos de estructuras. En primer lugar, porque su naturaleza orgánica hace de la madera un material más vulnerable al paso del tiempo. En segundo lugar, porque la escasez cada vez mayor de fuentes de suministro y los sistemas de explotación actuales obligan al uso de maderas mucho más jóvenes que las utilizadas en épocas anteriores y, por tanto, maderas más blandas y vulnerables a las degradaciones secundarias. Por último, tras el análisis de las degradaciones y ataques que puede sufrir la madera, mencionar la virulencia de algunos de ellos (ataque de termitas y otros organismos xilófagos) la dificultad de detectarlos a tiempo, ya que muchas veces los síntomas aparecen cuando el daño producido es excesivamente importante, y la dificultad de eliminarlos completamente una vez que se han iniciado.

Además de los tratamientos preventivos basados en el uso de diversas sustancias químicas y que se explican, cabe mencionar la efectividad de otro tipo de medidas de protección y prevención más relacionadas con el diseño y ejecución de la estructura:

- Es muy importante, tanto en edificios con sótano como en los que carecen de él, la ventilación de las cámaras de aire, o de los sótanos en su caso, y el aislamiento de los elementos estructurales de madera contra la humedad del terreno evitando el contacto directo con él mediante muros, zócalos o basamentos de otro material, generalmente pétreo. Asimismo, es preciso un aislamiento de la madera que apoya en estos elementos contra la humedad de capilaridad que asciende por ellos, al estar constituidos por materiales porosos.
- Las vigas no deben colocarse directamente sobre el muro, sino de manera que las cabezas queden aisladas, mediante un material no poroso, de la humedad que pueda albergar aquél y puedan mantener siempre cierto grado de ventilación.
- Habrá que prestar especial atención y, preferiblemente, tratar la madera, en los siguientes puntos conflictivos:
 - En los tejados, donde se pueden producir filtraciones de agua por fallos de impermeabilización, y en partes del edificio más expuestas al agua de la lluvia.
 - Las maderas de cuartos húmedos, sótanos y todas aquellas que puedan ser afectadas por averías o roturas de conducciones de agua o por humedad de condensación.
 - Las cabezas de vigas y pies derechos en contacto con el terreno o con muros, que son posibles fuentes de humedad por capilaridad.
 - La madera vieja reutilizada en un edificio nuevo y que puede estar ya atacada por hongos o insectos xilófagos.

5.2. TRATAMIENTOS SEGÚN EL TIPO DE SUSTANCIA

Los productos utilizados en la protección de la madera están formados generalmente por dos componentes: los principios activos, que son las sustancias que ejercen la función protectora propiamente dicha, y el disolvente, que es el vehículo utilizado para que los principios activos penetren en la madera. Los productos protectores de la madera son esencialmente químicos y tóxicos por lo que su aplicación y posterior secado, sobretodo en lugares cerrados, debe realizarse con prudencia. El peligro de toxicidad desaparece cuando el disolvente se ha evaporado por completo y el producto queda retenido en la madera. Hoy día los protectores suelen tener todas las características exigibles a este tipo de productos: ser inocuos o de toxicidad moderada, de estabilidad garantizada, resistentes al lavado, indife-

rentes o inhibidores frente al fuego, poco molestos en cuanto a olores o coloraciones posteriores al tratamiento, compatibles con la aplicación posterior de barnices o pinturas y, por supuesto, no perjudiciales para la madera.

El producto concreto de entre todos los posibles de cada tipo, la concentración de la disolución y el sistema de aplicación apropiado, en cada caso, dependen fundamentalmente de la especie de la madera, del tipo de protección (fungicida, insecticida, fungicida e insecticida, ignífuga, contra agentes climáticos) del grado de protección requerido y del grado de agresividad del ambiente en el que permanecerá la madera (al exterior o al interior, en contacto con el suelo o no,...).

5.2.1. Hidrosolubles

Son soluciones acuosas de sales metálicas o minerales que se presentan comercialmente en forma de polvo o pasta. De estas sales, unas constituyen los principios activos, y otras, los coadyuvantes, es decir, contribuyen a fijar las sales protectoras a la madera. La aplicación de estas soluciones se puede llevar a cabo por autoclave, por difusión o por métodos superficiales en general (barnizado, inmersión, etc). Son económicos y permiten una elaboración fácil, un control eficaz y una buena penetración, pero tiene el inconveniente de que el agua que se utiliza como disolvente puede afectar a la madera hinchándola y produciendo posibles deformaciones o su fisuración al secarse.

Las sales más utilizadas son generalmente combinaciones con: arsénico, cobre, cromo y zinc. A la hora de elegir el producto más apropiado es muy importante considerar, además de los factores mencionados anteriormente, si la madera va a estar en contacto con algún metal (clavos, tornillos, perfilería, carpintería,...) ya que las sales pueden provocar la corrosión de algunos metales.

5.2.2. En disolvente orgánico

Están formados por compuestos químicos orgánicos como principios activos que requieren disolventes orgánicos. Al igual que los protectores hidrosolubles tienen una buena penetración y se pueden utilizar los mismos sistemas de aplicación. El disolvente utilizado puede incrementar la inflamabilidad de la madera durante su evaporación y, aunque siempre será más caro que el agua utilizada en los protectores hidrosolubles, tienen la ventaja añadida de que no hinchan la madera y no atacan a los metales que pueda haber en contacto.

Las sustancias más empleadas son los nitrados, clorados (fenoles, bencenos y naptalenos), organometálicos y otras de composición más compleja. La sustancia adecuada, la concentración de la disolución y el método de aplicación, dependen de los mismos factores que los hidrosolubles.

5.2.3. Hidrodispersables o emulsiones

Utiliza, como principios activos los mismos que se emplean en disolventes orgánicos, solo que con un emulgente, que facilita su dispersión en el agua. Son por tanto una combinación de los dos protectores anteriores ya que emplea compuestos orgánicos como principios activos pero el agua como vehículo. Se aplican solamente por inmersión o por pulverización y presentan las ventajas e inconvenientes que aportaban sus dos componentes en los sistemas anteriores

5.2.4. Orgánicos naturales o creosotas

Son productos elaborados a partir del alquitrán de hulla o del petróleo. Son de fácil aplicación por inmersión o en autoclave, con las ventajas que ofrecen una buena penetración, una buena protección contra todo tipo de agente biótico, una mejor resistencia de la madera frente a los agentes climáticos y no son agresivos con los metales. A cambio presentan inconvenientes, como un lento proceso de secado y, sobre todo, un olor penetrante, un ennegrecimiento de la madera, una imposibilidad de aplicar pinturas y una abundante producción de humo en caso de incendio, todo lo cual hace que estos productos sean completamente inapropiados para el tratamiento de maderas de interior.

5.3. TRATAMIENTOS SEGÚN LA PENETRACIÓN DE LA SUSTANCIA PROTECTORA

Los productos protectores de la madera admiten por lo general diferentes sistemas de aplicación. Cada sistema de aplicación proporciona una penetración más o menos profunda del producto en la madera. Según el grado de penetración sea mayor o menor, lo cual también influye en la eficacia del protector, podemos diferenciar los tratamientos en impregnaciones, imprimaciones, barnices o lásures.

5.3.1. Impregnaciones

Suponen una penetración del protector de entre 2 y 3 centímetros. Se utilizan en casos de tratamientos en profundidad contra agentes bióticos y se llevan a cabo mediante autoclave, inmersión prolongada, inmersión caliente-fría, difusión o por inyecciones a baja presión. No permiten acabados concretos de la superficie de la madera.

5.3.2. Imprimaciones

Se realizan por inmersión, por vertido o aplicadas con brocha o pincel, por lo que la penetración del producto no sobrepasa los 2 ó 3 milímetros. Como las impregnaciones, sólo se utilizan como protección, aunque de menor profundidad, y no como acabado.

5.3.3. Barnices

Son tratamientos puramente superficiales en los que el protector no penetra en la madera sino que sólo queda adherido a la superficie. Por ello su aplicación es sencilla mediante brocha o pincel. No permiten una protección eficaz contra agentes bióticos ni contra la fotodegradación aunque sí protegen del deterioro que pueden producir el polvo, el aire o el agua y proporcionan el acabado que se desee.

5.3.4. Lásure

Constituyen, como los barnices, un tratamiento superficial que se aplica mediante brocha o pincel. Tienen propiedades biocidas, hidrófobas y protectoras de la fotodegradación causada por los rayos ultravioletas. Además proporcionan acabados decorativos. Pero la principal ventaja que proporcionan los lásure frente a los barnices es que los primeros forman una capa microscópica que permite una transpiración de la madera retardada y regulable mientras que los segundos forman una capa gruesa que impide la salida del vapor de agua contenido en la madera, lo cual no es bueno ni para ésta ni para la capa de barniz, que puede llegar a romperse por la presión de vapor.

Existen dos tipos de lásure: el lásur de capa fina, que tiene una gran capacidad de penetración, y el lásur de capa gruesa, que penetra menos, aunque ofrece una mayor protección superficial.

5.4. TRATAMIENTOS SEGÚN SU FORMA DE APLICACIÓN

La forma de aplicación del producto protector es tan importante como una adecuada elección de éste. Los tratamientos han sido ordenados de menor a mayor grado de penetración en la madera.

5.4.1. Pincelado

El protector se aplica superficialmente mediante pincel, brocha o rodillo. Con este método de aplicación suelen utilizarse principios activos en disolvente orgánico. Puede utilizarse como tratamiento preventivo y como tratamiento curativo.

5.4.2. Pulverizado

El protector se aplica superficialmente mediante pulverizador manual o mecánico. También suelen utilizarse en este caso principios activos en disolvente orgánico. Puede utilizarse igualmente como tratamiento preventivo y curativo.

5.4.3. Inmersión breve

La pieza de madera se sumerge totalmente en el producto durante un tiempo breve (entre unos segundos y diez minutos). Suelen emplearse en este caso protectores hidrosolubles o en disolvente orgánico. La protección no deja de ser superficial. Este tratamiento es más preventivo que curativo ya que para llevarlo a cabo es necesario trasladar la pieza, lo cual es raramente posible cuando ya se ha puesto en obra.

5.4.4. Inmersión prolongada

La pieza de madera se sumerge totalmente en el producto durante más de diez minutos. Según el tiempo empleado sea mayor o menor así será el grado de penetración logrando impregnar o solamente imprimir. Como en la inmersión breve, se pueden aplicar productos hidrosolubles o en disolvente orgánico y se utiliza solamente como tratamiento preventivo.

5.4.5. Inmersión caliente-fría

Se trata de una variante del tratamiento por inmersión prolongada y se puede llevar a cabo de dos maneras: sumergiendo la madera en el producto y calentándolo para llevarla rápidamente a otro depósito con el producto a temperatura ambiente, o bien sumergiéndola y calentando, pero luego dejando enfriar la madera en el mismo depósito. Esto permite conseguir que la madera quede mejor impregnada del protector.

5.4.6. Ósmosis o difusión

Consiste en humedecer previamente la madera para luego aplicar en su superficie el protector en una solución muy concentrada de manera que el principio activo se difunde al interior de la pieza por presión osmótica. Con esto se consigue una buena impregnación de la madera. Suele utilizarse con protectores hidrosolubles.

5.4.7. Autoclave

El autoclave es un cilindro hueco y cerrado en el que se introduce la pieza de madera para impregnarla del protector mediante la aplicación de vacíos y presiones. Según la combinación y la intensidad de estos vacíos y presiones se consiguen diversos resultados: impregnar las paredes celulares rellenando los vacíos o lumen (sistema de célula llena), impregnar las paredes celulares pero dejando sin rellenar el lumen (sistema de célula vacía) o controlando mediante dos procesos de vacío la cantidad de protector que se introduce en la madera (doble vacío). Se suelen utilizar protectores en disolvente orgánico. Al igual

que la aplicación por inmersión prácticamente solo puede utilizarse en tratamientos preventivos.

5.4.8. Inyección

Es casi el único tratamiento curativo que permite una penetración profunda por lo que es el que se utiliza para impregnaciones de madera ya puesta en obra. No tiene mucho sentido utilizarlo como tratamiento preventivo ya que para esto hay otros sistemas más efectivos como el autoclave. Se lleva a cabo realizando taladros en la pieza o aprovechando los orificios practicados por los insectos e inyectando mediante un compresor a través de una boquilla con válvula sin retorno que se ha acoplado previamente, o bien, en piezas horizontales, mediante embudos, dejando que la madera absorba el producto por capilaridad y por gravedad. Los taladros se practican al tresbolillo. Su separación y profundidad y la mayor o menor presión que se debe aplicar al inyectar dependen de la profundidad que se requiera en el tratamiento, de la especie de madera y de la capacidad de penetración del producto.

6. TRATAMIENTOS CURATIVOS DE LA MADERA

Los tratamientos curativos de la madera son aquellos que se llevan a cabo en la madera puesta en obra y atacada, para eliminar el agente causante del deterioro y protegerla contra nuevos ataques.

6.1. GENERALIDADES

El tratamiento curativo es un proceso que no consiste únicamente en la aplicación de un producto químico a la madera sino en un conjunto de acciones del que este último forma parte. El proceso debe llevarse a cabo en el siguiente orden:

- **Estudio previo**, en el que se deberán tomar todos los datos necesarios para determinar el estado de degradación de la madera, el agente causante de la degradación, las causas que han favorecido la actuación de dicho agente y, posteriormente, el producto protector más apropiado y la posible necesidad de reparación de la madera afectada.
- **Análisis de los datos y diagnóstico**, en el que se establezca, a partir de los datos obtenidos en el estudio previo, el agente causante del deterioro y las acciones previstas para proteger, reparar, si es necesario, y prevenir futuros ataques.
- **Eliminación de las condiciones** que han favorecido el ataque y desarrollo de los agentes causantes de la degradación. Esto llevará, en algunos casos, a la reparación de elementos constructivos dañados (con-

ducciones de agua, tejas, etc) y, en otros, a la adopción de soluciones constructivas apropiadas que, de haberse llevado a cabo en su momento, hubieran evitado o retardado el proceso patológico.

- **Reparación del elemento constructivo.** Este paso no siempre es necesario. Solamente cuando la pérdida de capacidad resistente debido al deterioro lo requiere, por lo que será necesario evaluar la capacidad resistente residual de la pieza.
- **Aplicación de los productos protectores.** De lo referente a la elección del producto protector más apropiado, profundidad o grado de penetración del mismo, sistema de aplicación, etc, ya se ha hablado en el apartado anterior (tratamientos preventivos) y es aplicable a los tratamientos curativos. Únicamente resta especificar que algunos sistemas de aplicación, como el autoclave, no pueden utilizarse en tratamientos curativos ya que requieren la manipulación y el transporte de la pieza.

6.2. TRATAMIENTOS SEGÚN EL AGENTE CAUSANTE DE LA DEGRADACIÓN

6.2.1. Agentes climáticos

El mejor tratamiento para proteger la madera expuesta de la fotodegradación y posterior lavado consiste en la aplicación superficial de filtros o pigmentos.

6.2.2. Fuego

En los elementos de madera afectados por fuego será necesario, en primer lugar, eliminar la capa superficial carbonizada. Después habrá que evaluar la capacidad resistente de la nueva sección de la pieza para determinar si es aceptable. En caso de que no fuera satisfactoria, se procedería a su sustitución o refuerzo, pero si esto no es imprescindible y se conserva el elemento, se protegerá mediante la aplicación de productos ignífugos (algunos protectores hidrosolubles) que retardan la combustión de la madera.

6.2.3. Hongos

La principal medida para acabar con ataques de hongos es la eliminación de la humedad. Además, según el tipo de hongo y la intensidad del ataque, será necesario adoptar otras medidas.

Los hongos cromógenos requieren la pulverización de la madera con productos fungicidas. Los hongos xilófagos o de pudrición son los más peligrosos y cuando el

ataque está muy avanzado no hay tratamiento curativo posible, quedando como único recurso la sustitución o refuerzo de la madera afectada por madera nueva tratada con productos para prevenir futuros ataques. Si el estado de deterioro no es muy grande se impregnará la madera con protectores orgánicos mediante inyección complementada con pulverización, o simplemente pulverización para piezas de poco espesor. Además, cuando se trata de hongos de pudrición seca, se extenderá el tratamiento a todos los elementos en un radio de dos o tres metros (muros, tabiques, relleños, etc...).

6.2.4. Coleópteros

Se puede proceder de dos maneras:

Si es posible, eliminar la capa superficial de la madera para descubrir la extensión del ataque, ya que las galerías de la carcoma no suelen ser profundas. Después de sanear la madera eliminando las partes afectadas, pulverizar la superficie con productos protectores, preferiblemente orgánicos, que penetran con facilidad.

Si no es deseable o posible eliminar la capa exterior de la madera habrá que proceder inyectando el producto químico, también preferiblemente orgánico. Si el ataque es puntual y se conoce bien su extensión, se puede inyectar solamente en la zona afectada y pulverizar el resto como medida preventiva.

6.2.5. Termitas subterráneas

Estas termitas son características de la Península; necesitan una vía de contacto continuo con la humedad del suelo. Es casi imposible acabar con las colonias de termitas en el terreno cercano a un edificio, por lo que la única manera de protegerlo es estableciendo barreras tóxicas para evitar que lleguen a la madera.

La primera medida que se debe adoptar es la eliminación de las posibles fuentes de humedad y la sustitución de las piezas de madera excesivamente deterioradas por otras tratadas convenientemente. A continuación se aislará el edificio mediante la inyección de un protector en el suelo de la planta baja o del sótano, en el terreno que circunda al edificio y en los arranques de los muros. Por último, se tratará químicamente la madera para prevenir futuras infecciones, mediante inyecciones en las piezas de gran espesor y pulverización superficial en las carpinterías.

El segundo método consiste en aplicar insecticidas que atacan directamente al sistema reproductor de los insectos impidiendo la muda de su piel, proceso necesario para el desarrollo de los insectos (el insecticida actúa como inhibidor de la síntesis de la quitina).

El producto es ingerido por las termitas obreras que a través de su comportamiento social lo transmiten a la colonia, consiguiendo la eliminación de la misma, aunque para ello se requiera un periodo largo de tiempo.

6.2.6. Termitas de madera seca

Estas termitas habitan fundamentalmente en las Islas Canarias. Son capaces de establecer pequeñas colonias independientes en diversos puntos del edificio. Su tratamiento se lleva a cabo de forma similar a los de los insectos de ciclo larvario (carcoma, polilla, etc) y deberá garantizar la eliminación completa de dichas colonias.

7. TÉCNICAS DE REPARACIÓN

Las técnicas de reparación tienen como fin devolver total o parcialmente la capacidad resistente originaria que tenían los elementos de madera afectados por la degradación para hacer frente a los cometidos para los que fueron pensados. Es necesario insistir en que no cabe abordar la reparación de la estructura antes de eliminar el agente causante del daño o, cuando esto no es materialmente posible, prevenir contra su acción. También hay que decir que, en no pocas ocasiones, se recurre a algunas de estas técnicas de reparación sin que la estructura presente daño, con objeto de reforzar elementos de madera y así aumentar su resistencia o estabilidad con vistas a adaptar el edificio a un uso diferente del original que conlleve mayores sobrecargas.

7.1. SUSTITUCIÓN MATERIAL

Consiste en la eliminación total o parcial del elemento estructural afectado para colocar en su lugar otro en buen estado o de mayor capacidad resistente. Durante el proceso será necesario apejar la estructura y tomar las medidas de seguridad que garanticen la estabilidad del resto de la misma. Esta técnica debe ser rechazada cuando el valor artístico o histórico de la estructura existente aconsejen su conservación.

7.1.1. Sustitución total

Se lleva a cabo cuando la degradación afecta de forma generalizada a un elemento estructural o cuando no es conveniente su conservación parcial por razones de tipo constructivo o económico. El material del elemento nuevo no tiene por qué ser el mismo que el del existente, pudiendo sustituirse forjados, viguetas, vigas, soportes, etc, de madera por otros nuevos de acero laminado o de hormigón armado, pero teniendo siempre en cuenta el aumento de peso propio de la estructura que conlleva este tipo de sustitución. Si el elemento nuevo es de madera, deberá estar tratado para prevenir su degradación.

7.1.2. Sustitución parcial (prótesis)

Se lleva a cabo en elementos estructurales cuando la lesión afecta a una parte muy localizada y es aconsejable la conservación del resto. Suele darse el caso en cabezas de vigas o viguetas empotradas, en arranques de soportes en vanos situados bajo cuartos húmedos y, en general, en zonas susceptibles de provocar humedades y pudrición en la madera. Esta sustitución parcial suele realizarse con elementos metálicos (perfiles) o con madera. Cuando la sustitución se realice con una pieza de madera, ésta debe ser del mismo tipo, iguales dimensiones y contenido de humedad lo más parecido posible al de la madera existente.

Lo más delicado de este tipo de sustitución es la transmisión efectiva de esfuerzos a través de la nueva pieza. El caso menos problemático es el de los soportes, sometidos casi exclusivamente a esfuerzos de compresión.

En el caso de prótesis de madera el corte dado a la pieza debe ser perpendicular a las tensiones. En vigas o viguetas, normalmente sometidas a esfuerzos de tracción, cortante o momento flector, la transmisión debe garantizarse labrando el ensamble en rayo de Júpiter utilizando colas adecuadas y asegurando la unión mediante piezas metálicas.

7.2. SUSTITUCIÓN FUNCIONAL

Consiste en la conservación de los elementos existentes, pasando a desempeñar su función estructural otros elementos nuevos. Se lleva a cabo cuando interesa la conservación de la estructura existente o cuando no merece la pena proceder a su eliminación.

Como en el caso de la sustitución total, se puede realizar con piezas nuevas de madera convenientemente tratadas o con piezas de otro material, teniendo en cuenta el aumento de peso de la estructura.

7.2.1. Elementos lineales

Es corriente la sustitución funcional de viguetas en forjados de madera. Se lleva a cabo eliminando el material de relleno existente entre las viguetas y colocando en su lugar viguetas nuevas de madera, acero laminado u hormigón armado o pretensado. Tiene la ventaja de que suele ser innecesario apejar, ya que al no eliminar las viguetas antiguas, éstas continúan desempeñando su función provisionalmente durante la operación. En el caso de sustituir el relleno por hormigón armado, creando unas nuevas vigas entre las viguetas de madera existentes, sí será necesario apejar ya que es imprescindible encofrar el fondo de la nueva viga y, además, el peso del hormigón fresco, que todavía no ha adquirido suficiente resistencia, puede hacer colapsar el forjado de madera.

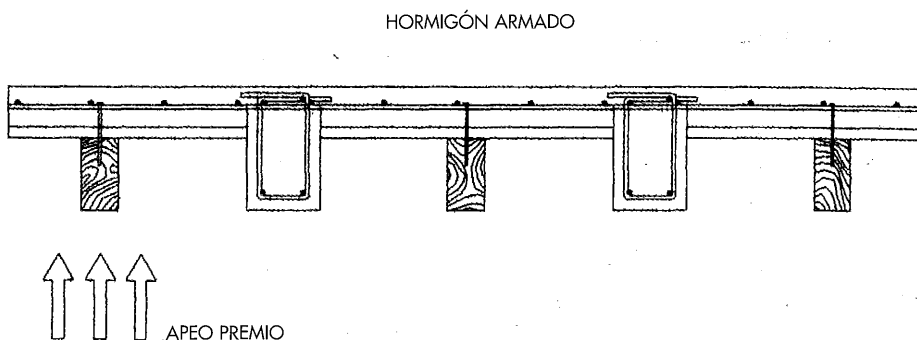


Fig. 4.7. Sustitución funcional de un entrevigado y su capa de reparto por una estructura de hormigón armado.

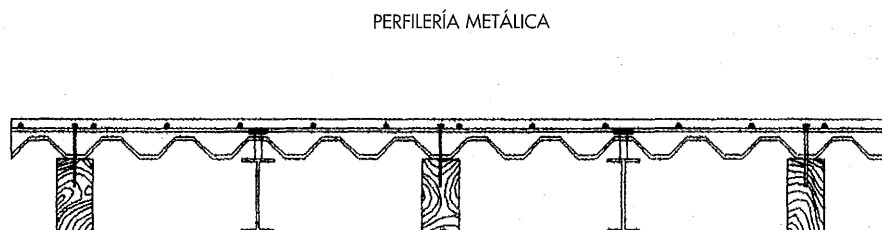


Fig. 4.8. Sustitución funcional de un entrevigado y su capa de reparto por una estructura metálica de perfiles laminados y chapa plegada.

En cualquier caso, habrá que estudiar el efecto del peso de los nuevos elementos sobre el conjunto de la estructura y la solución del apoyo, que puede realizarse mediante un cajeado en el muro antiguo, mediante una carrera transversal adosada al muro y apoyada en él por ménsulas, o mediante el apoyo de sus extremos en un muro transversal, o en soportes nuevos.

7.2.2. Forjados

Cuando la lesión no se limita a unas pocas viguetas sino que afecta de forma generalizada a todo el forjado, se puede recurrir a la construcción de una losa de hormigón armado sobre el forjado de madera. Para esto se eliminan los pavimentos y morteros de agarre, previo saneamiento y tratamiento de la madera, se coloca un mallazo con las separaciones necesarias y se vierte el hormigón

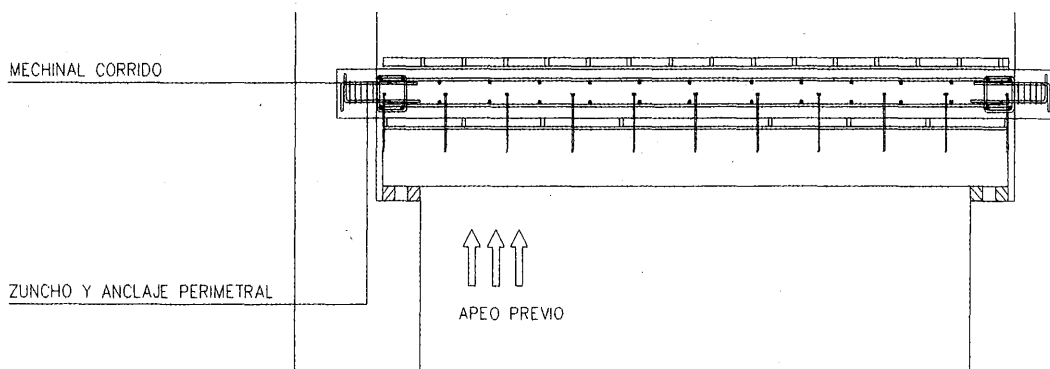


Fig. 4.9. Sustitución funcional de forjados mediante la creación de losas de hormigón apoyadas perimetralmente.

directamente sobre el forjado existente, que sirve de encofrado perdido. En este caso hay que apear para que el peso del hormigón fresco no agote la resistencia del forjado antiguo. Éste quedará colgado de la losa mediante unos conectores al endurecer el hormigón.

Es necesario estudiar detenidamente la solución y el diseño del apoyo en el muro, el armado de esta zona, la capacidad del muro para soportar el peso de la losa y la posibilidad de utilizar hormigones ligeros o aligerados. El apoyo en el muro puede realizarse practicando unos mechinales a distancias regulares o, si es posible, mediante un cajeado continuo. Si no se tiene la certeza de que el muro pueda resistir las nuevas cargas, el apoyo deberá realizarse mediante nuevos soportes adosados o embebidos que tendrán que tener su propia cimentación.

7.3. REFUERZO

La conservación implica, no sólo la no eliminación de los elementos existentes sino también el mantenimiento de su función estructural.

7.3.1. Apeo o apuntalamiento

Consiste en la adición de nuevos elementos que reestructuran el conjunto, es decir, modifican la transmisión de los esfuerzos y la manera de trabajar de la estructura. Normalmente, los apeos tratan de reducir luces en el caso de vigas o viguetas, o de disminuir los esfuerzos de los elementos debilitados trasladando parte de las cargas que soportan a otros elementos, ya sean nuevos o antiguos. Las opciones

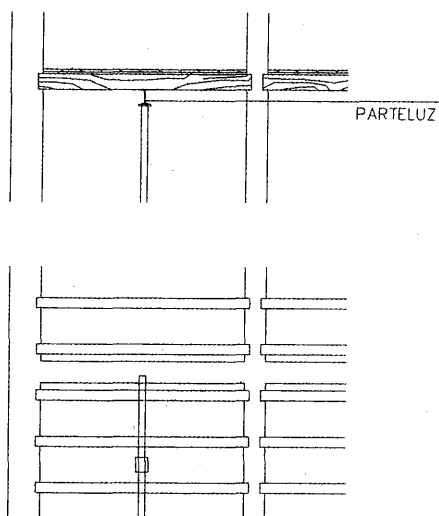


Fig. 4.10. Apuntalamiento con vigas parteluz.

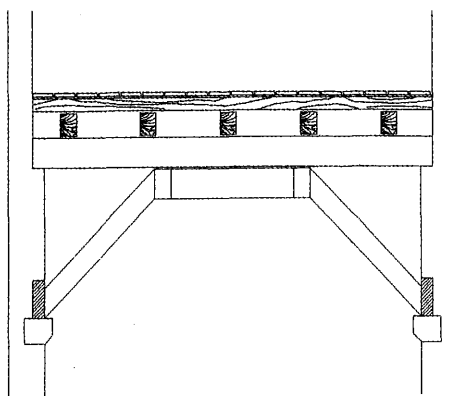


Fig. 4.11. Apuntalamiento mediante jabalcones.

más corrientes son:

- **Apuntalamiento de las viguetas en el apoyo:** consiste en disponer carreras de apoyo debajo de las cabezas de las correas o viguetas. Estas carreras pueden apoyar en los muros transversales mediante ménsulas empotradas, mediante nuevos soportes adosados al muro o apoyada en sus extremos en los muros transversales, si es posible.
- **Apuntalamiento de viguetas mediante vigas parteluces:** consiste en dividir la luz de las viguetas mediante una o dos jácenas colocadas perpendicularmente, que apoyarán, bien en muros transversales o bien en soportes nuevos con cimentación propia.
- **Apuntalamiento de vigas mediante jabalcones,** lo que permite reducir sensiblemente la luz de los vanos.

7.3.2. Refuerzo con madera

Consiste en mejorar las características mecánicas de cualquier elemento estructural (viguetas, vigas o soportes) aumentando su sección al adosarle escuadrías de madera. El problema es garantizar el trabajo solidario de la pieza antigua y del recrecido, lo cual se puede realizar por medios mecánicos (clavos, tornillos, pasadores, abrazaderas, etc) o mediante encolado con resinas. En el caso de piezas flectadas, sobre todo si se utilizan medios mecánicos en la unión, aunque el aumento de canto suponga un mayor rendimiento en el refuerzo, es más difícil por las tensiones rasantes garantizar el trabajo conjunto que adosando escuadrías lateralmente.

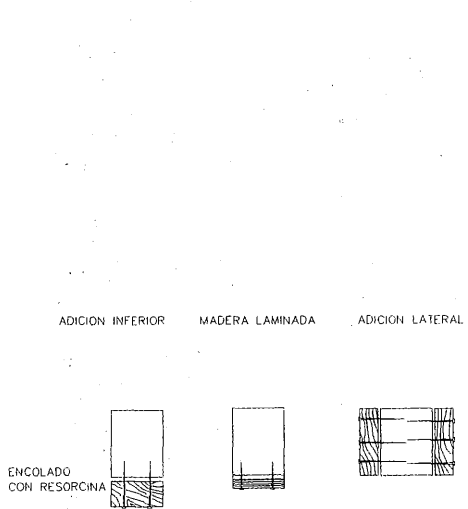


Fig. 4.12. Refuerzos inferiores y laterales con elementos de madera.

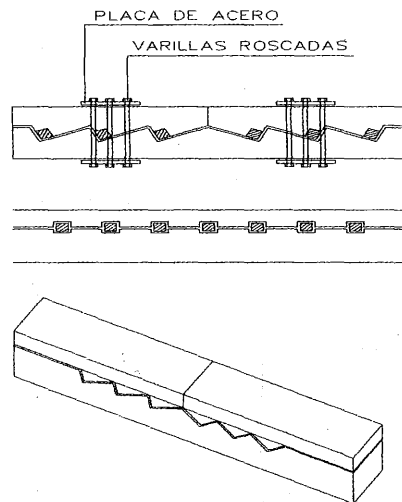


Fig. 4.13. Sistema de refuerzo para mejorar el trabajo a flexión.

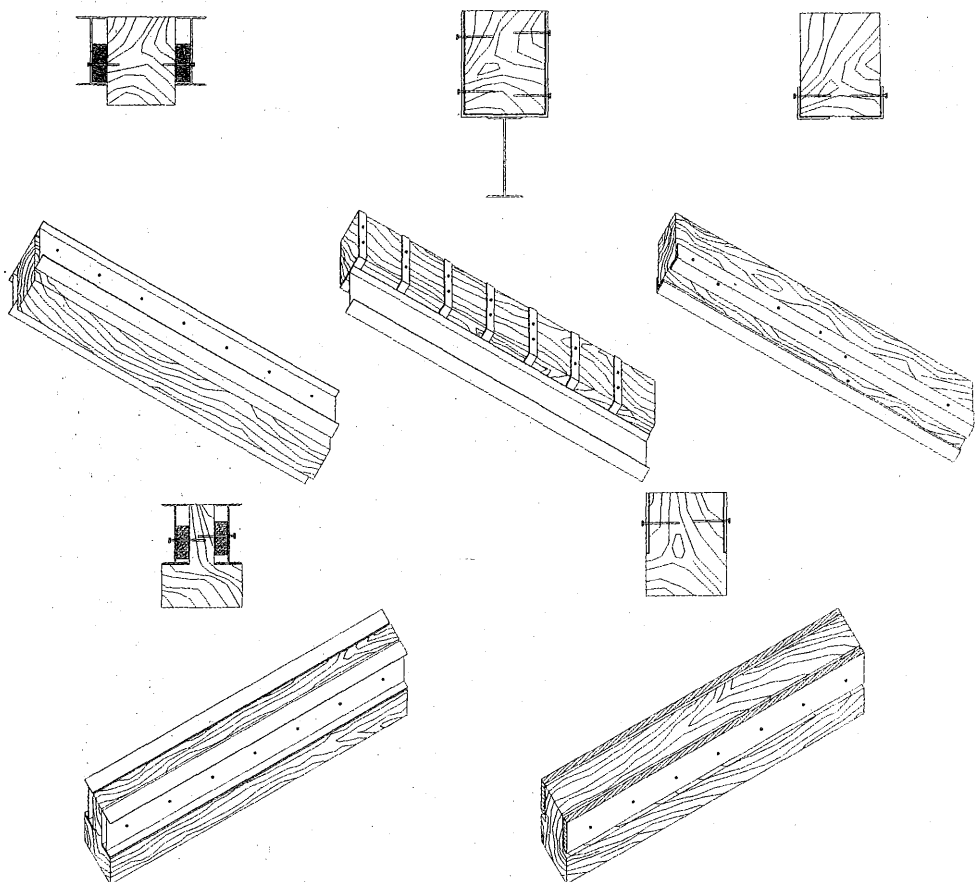
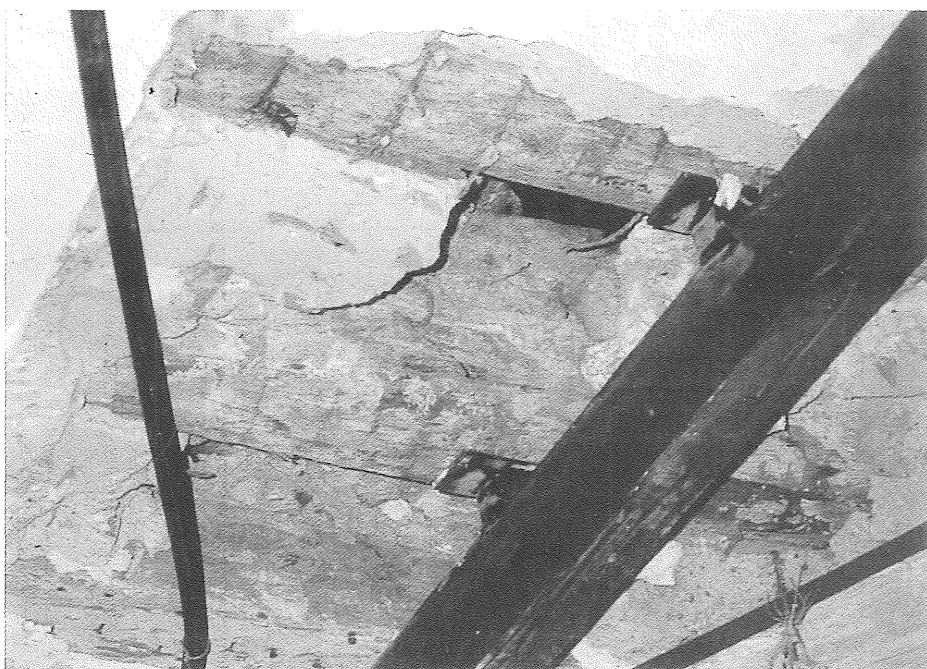


Fig. 4.14. Diferentes soluciones de refuerzo de vigas de madera con perfiles de acero laminado.



4.10. Apoyo de las cabezas de un forjado de madera con entrevigado cerámico mediante perfiles metálicos.



4.11. Detalle de transmisión de cargas del forjado de madera a la estructura metálica mediante casquillos.



4.12. Refuerzo de un forjado de madera mediante estructuras metálicas.



4.13. Refuerzo de una viga de madera mediante angulares metálicos.



4.14. Refuerzo de un armado de madera de cubiertas mediante perfiles de acero laminado y tirantes formados por cables.



4.15. Refuerzo de una estructura vertical de madera mediante cuatro angulares empresillados que "abrazan" al pie derecho.

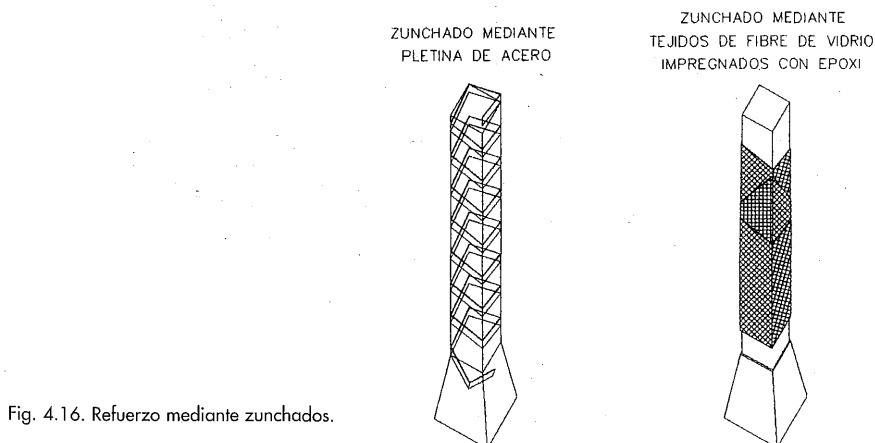
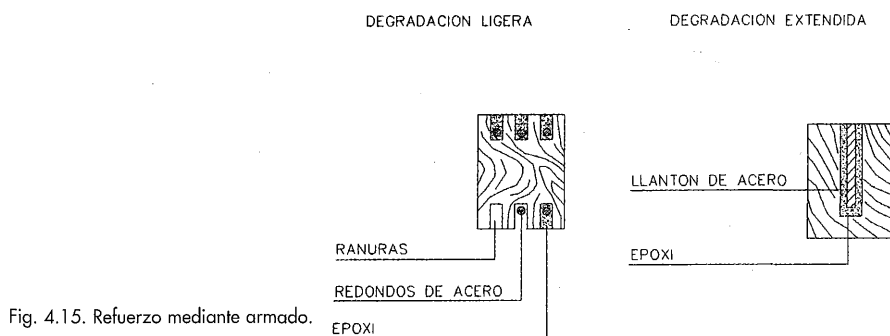
7.3.3. Refuerzo con perfilería metálica

Consiste en mejorar las características mecánicas de los elementos estructurales adosando perfiles o chapas metálicas. El sistema tradicional es muy similar al refuerzo con escuadrías de madera, pudiendo igualmente realizar la unión por medios mecánicos o por adhesivos. Las soluciones son muy variadas según se utilicen diferentes tipos de perfiles o de chapas y según se adosen lateralmente, por encima o por debajo de las piezas flectadas.

Otro sistema consiste en embutir una placa o pletina metálica en el canto de la pieza de madera, realizando un cajeado para alojar en él la placa y asegurando la unión de los dos materiales con resina epoxi.

7.3.4. Armado

Permite el refuerzo y consolidación de cabezas de vigas o viguetas, o de zonas intermedias que han sufrido rotura o degradación, mediante la introducción en



taladros practicados en la pieza de barras de acero o de fibra de vidrio embebidas en resina epoxi. La solución de pletina metálica embutida en el canto de la pieza y explicada en el apartado de refuerzo con perfilería metálica, podría considerarse igualmente una solución de armado.

7.3.5. Zunchado

Se trata de una solución utilizada en el caso de refuerzo de soportes debilitados o excesivamente esbeltos que se lleva a cabo zunchándolos, bien mediante una pletina helicoidal clavada y encolada con resina epoxi al soporte o bien mediante tejidos de fibra de vidrio encolados también con epoxi, que se enrollan helicoidalmente al soporte en una o varias capas contrapeadas.

7.3.6. Atirantado o postesado

La disposición de tirantes anclados en las testas de las vigas permite mejorar su

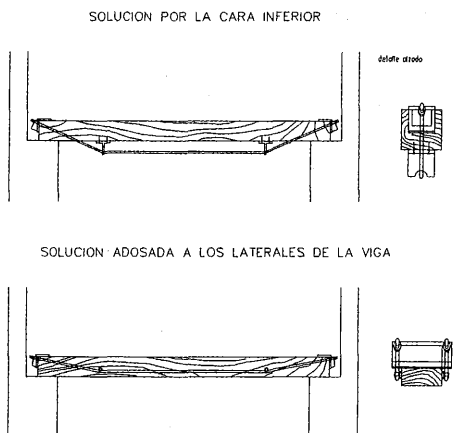


Fig. 4.17. Refuerzo mediante postesado.

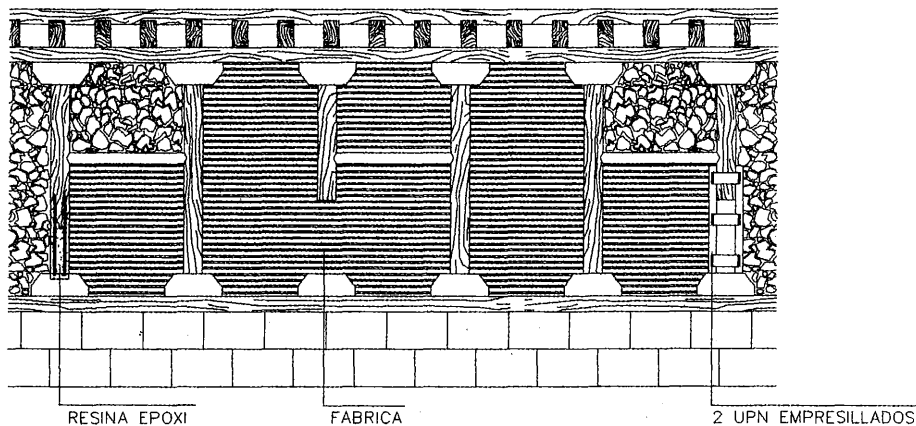


Fig. 4.18. Diferentes soluciones de actuaciones sobre estructuras de madera aplicadas a un entramado tradicional.

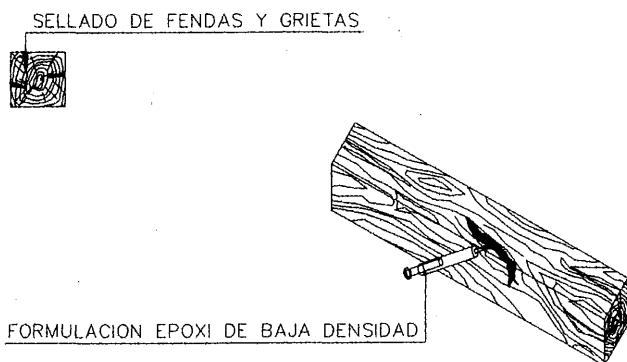


Fig. 4.19. Consolidación por inyección.

comportamiento mecánico y reducir su deformación. Estos tirantes pueden colocarse por la parte inferior de la viga, separados por casquillos, o adosados en los laterales. Un atirantado introduce en la viga de madera nuevos esfuerzos cuya magnitud habrá que estudiar previamente por si la pieza no fuera capaz de soportarlos.

7.4. CONSOLIDACIÓN

Implican el refuerzo sin modificación, o con una modificación mínima, del aspecto exterior de los elementos existentes. Son técnicas generalmente novedosas y de elevado coste económico y, por tanto, útiles sólo en estructuras que tienen un especial valor artístico o histórico y que requieren la conservación de su aspecto visual.

Se llevan a cabo de forma similar a las inyecciones de productos protectores de la madera, solo que en este caso lo que se inyecta es una formulación epoxi de muy baja densidad para facilitar su penetración. Previamente se requiere un sellado de las fisuras superficiales de la pieza para que la inyección no escape y rellene bien todos los huecos. Es un sistema especialmente apropiado para coser piezas de madera excesivamente fisuradas por fendas producidas por lo general al secarse la madera.

7.5. REINTEGRACIONES

Consiste en la eliminación de una zona muy delimitada y degradada de un elemento (generalmente las cabezas de vigas y viguetas o los pies de soportes) y su reconstrucción con un material moldeable que adopte la forma de la parte eliminada mediante un encofrado. Al tener que eliminar, previamente al vertido la parte insana de la madera, requiere siempre un apeo como medida de seguridad. Lo más

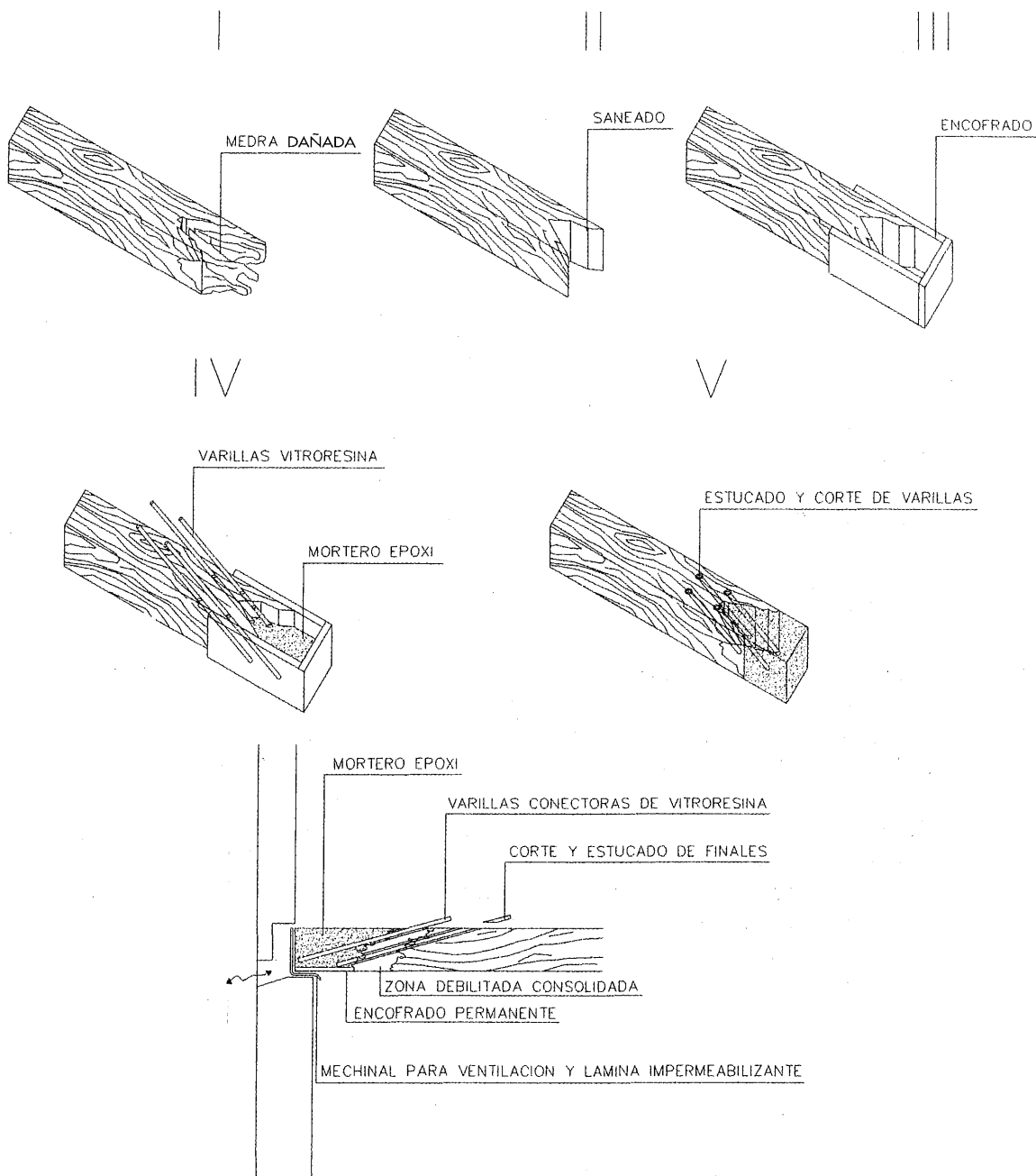
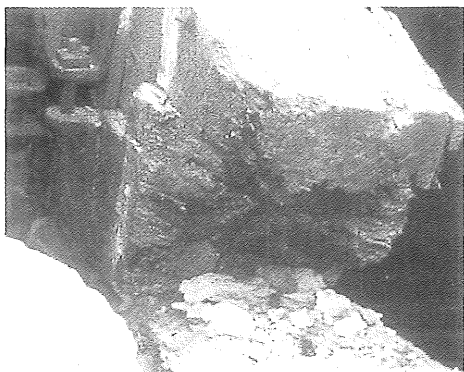
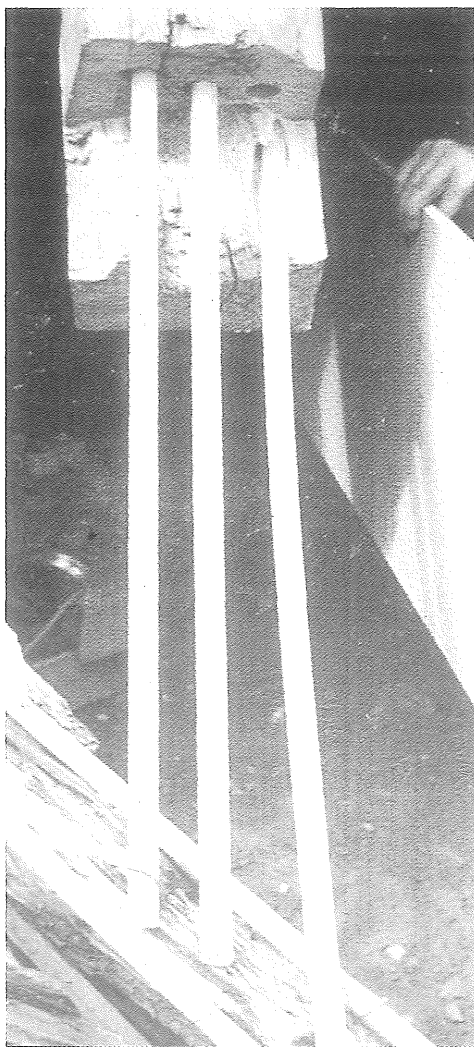


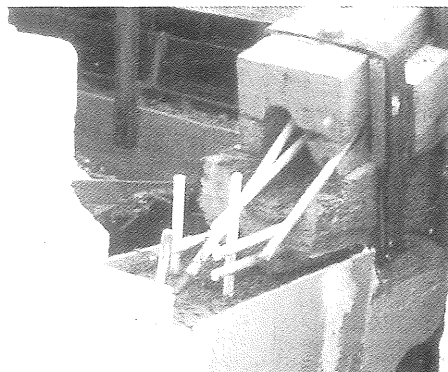
Fig. 4.20. Prótesis: Sistema Beta.



1. Saneado de la pieza mediante la eliminación de la zona dañada.



2. Realización de taladros. Introducción de varillas.



3. Realización de encofrado y vertido de mortero con resinas.



4. Desencofrado.



5. Puesta en carga.

4.16. Sistema "Beta" de ejecución de prótesis en estructuras de madera (fotografías de la información técnica de la casa Promax. PROTECCIÓN DE MADERA S.A.)

importante, como en otras soluciones, es garantizar el trabajo conjunto de los dos materiales, el nuevo y la madera. Distinguimos entre:

- **Estucado:** se trata de la reconstrucción de pequeñas zonas que se rellenan con mortero epoxi y arcilla. Al estar limitado el trabajo solidario de la madera y el mortero solamente por la adhesión entre los dos materiales sin ningún elemento conector adicional, el volumen de madera sustituido no debe ser muy grande y es conveniente que las tensiones existentes en la superficie de contacto sean perpendiculares a ésta y de compresión. El estucado está orientado más bien a la reparación de pequeños desperfectos o zonas lesionadas, grietas o fendas, relleno de taladros realizados para llevar a cabo una inyección o para tomar testigos con el fin de analizar la madera, etc.
- **Sistema beta:** como el estucado, es una solución que consiste en la reconstrucción de la parte de madera perdida o eliminada, con un mortero de epoxi pero, a diferencia de aquél, se garantiza mucho mejor la transmisión de esfuerzos al estar conectados el mortero y la madera mediante varillas de vitrorresina (fibra de vidrio y resina de poliéster), con lo que la reparación puede llevarse a cabo sobre zonas más amplias y delicadas, como puntos de apoyo. Las varillas conectoras quedarán embebidas en el mortero en la mitad de su longitud e introducidas en la madera en su otra mitad a través de taladros practicados y posteriormente rellenos con la misma formulación epoxi más fluida. El trabajo concluye con el estucado de las bocas de los taladros.

Capítulo 5

ESTRUCTURAS METÁLICAS

1. ANTECEDENTES

El uso del acero en las estructuras de los edificios surge en la segunda mitad del siglo XIX como consecuencia de dos factores básicos:

- **La necesidad** de encontrar un sustituto de la madera, como único material hasta entonces capaz de absorber esfuerzos simultáneos de tracción, compresión y flexión, para resolver las grandes luces en los edificios con un sistema estructural más flexible y ligero que la bóveda.
- **La posibilidad** que ofrece la revolución industrial de obtener perfiles laminados de gran longitud, relativamente fáciles de manipular y unir entre sí.

Desde entonces, la evolución de la tecnología ha aumentado esta posibilidad, tanto en tipos de perfiles (hasta los tubulares actuales de gran ligereza) como en su unión (la soldadura) lo que ha hecho de las estructuras metálicas una solución casi única para grandes luces y grandes alturas.

A pesar de su corta edad y de la tecnología que las acompaña, las estructuras metálicas son susceptibles también de sufrir procesos patológicos que hacen peligrar su integridad constructiva y, por tanto, la seguridad del edificio. Dichos procesos pueden derivarse, bien del propio material, relativamente débil ante el ataque químico del medio ambiente, bien de la solución constructiva adoptada, tanto por su proyecto como por su ejecución. Por todo ello, conviene analizar estos procesos patológicos y establecer las técnicas de intervención para su reparación, así como las medidas de prevención que debemos tener en cuenta en proyecto y ejecución.

En cualquier caso, para entender mejor esos procesos patológicos, sobre todo los referidos al material, conviene que repasemos brevemente los tipos de aceros empleados y sus características mecánicas, físicas y químicas. Asimismo, deberemos recordar los distintos sistemas y técnicas de unión entre elementos.

1.1. ACEROS USADOS EN CONSTRUCCIÓN

El hierro y el acero son productos que se conocen desde muy antiguo y que se han empleado en construcción. Su empleo, no obstante, ha sido muy limitado debido, fundamentalmente, a que los procedimientos de obtención tenían muy poca capacidad de producción, esto hacía que fuese un material muy caro. Desde antiguo también se conocía que algunos metales férreos, si se enfriaban desde una temperatura elevada, sumergiéndolos en agua o en otro líquido (templándolos) podrían ser muy duros, mientras que otros no endurecían. Los primeros eran el acero y los segundos el hierro. Este hecho se debía a la existencia de carbono en canti-

dad suficiente y, aunque no conocían los fabricantes la importancia de este elemento, procediendo por tanteos, desarrollaron métodos empíricos para obtener materiales adecuados para dicho tratamiento.

El producto obtenido en los hornos y forjas, lo era en forma de esponja que se batía por medio de martillos con el fin de expulsar la escoria y aglutinar el hierro, obteniéndose un producto similar al conocido actualmente como hierro forjado. Durante la Edad Media se mejoraron los métodos de obtención aumentando la temperatura en los hornos hasta conseguir, en el siglo XVI, hacer fundir el hierro. Al fundirse, éste se podía extraer periódicamente de los hornos en estado líquido sin necesidad de interrumpir el proceso, aumentando el rendimiento del mismo. El producto así obtenido se dejó enfriar con el fin de batirlo, como se hacía con el hierro esponjoso, pero no se pudo realizar debido a su gran fragilidad y solo podía aprovecharse colándolo en moldes, por lo que el producto obtenido se llamó hierro colado. Actualmente se conoce al hierro colado como “fundición” y su fragilidad se debe a que contiene un elevado porcentaje de carbono.

En 1720, Abraham Darby inició el empleo del coque como combustible para la obtención del hierro fundido en grandes cantidades. El coque tiene una elevada potencia calorífica, lo que permite altas temperaturas; su dureza y resistencia mecánica le permite aumentar la cantidad de material a fundir, aumentando la capacidad de producción. Gracias a ello, en 1779, Abraham Darby III, nieto del anterior, proyectó y construyó en Coalbrookdale la primera estructura totalmente metálica: el puente sobre el río Severn. Este puente tiene una luz de 100 pies (30 m) y consta de 5 arcos semicirculares de fundición, con un peso total de 378 T. Fue el primero de una serie de puentes construidos en esa zona hasta finales del siglo XVIII con hierro fundido.

En 1801, se construyó la fábrica textil de Salford (Manchester) construida por Boulton y Watt, que es la primera estructura metálica en edificación, también de fundición. Los esfuerzos horizontales (viento) todavía eran absorbidos por las paredes de mampostería. No obstante, había empezado el uso de estructuras metálicas para edificios.

En cuanto al material, en 1784 Henry Cort patentó el horno de pudelado, que permite obtener el hierro forjado a partir de la fundición reduciendo su contenido en carbono mediante oxidación. De esta forma se abarató considerablemente su obtención, aunque no era todavía competitivo frente a la fundición, ya que requería más operaciones. No obstante, la fundición es un material frágil y con poca resistencia a tracción, mientras que el hierro forjado es dúctil y con una resistencia semejante a tracción y compresión. Esto hizo que se empleasen simultáneamente ambos materiales, limitando el hierro forjado a los elementos solicitados a tracción.

A consecuencia de la fragilidad de la fundición se produjeron numerosos accidentes, lo que hizo prácticamente que se abandonase su empleo, limitándolo a los pilares y soportes por su resistencia a compresión y la facilidad con que se pueden formar secciones en cajón. El primer empleo del hierro forjado, a gran escala, fue en el puente colgante sobre el estrecho de Menai, proyectado por Thomas Telford y terminado en 1826. La luz de puente es de 173 m. y se emplearon 2.187 Tm. de hierro. La primera estructura de importancia, construida totalmente de hierro forjado, es el puente Britannia, situado cerca del puente de Menai.

Hacia 1850, se empieza a laminar el hierro. El proceso se realiza agrupando las barras de material en paquetes. Estos paquetes se calentaban y se pasaban por el tren de laminación, produciéndose en esta operación la soldadura de las barras. El producto así obtenido era normalmente hojoso y tenía numerosos defectos de soldadura y homogeneidad, siendo claramente anisótropo.

El siguiente paso fue la obtención de acero mediante convertidor, que fue patentado en 1855 por Bessemer. Este procedimiento consiste en eliminar el carbono y las impurezas de la fundición, oxidándolas por medio del oxígeno del aire y haciéndolo pasar a través del metal líquido. Se mejoró considerablemente cuando en 1878 Thomas consiguió el afino por vía básica, lo que aseguraba la eliminación del fósforo y azufre cosa que el convertidor Bessemer era incapaz de hacer. El fósforo y el azufre, son dos elementos indeseables porque aumentan la fragilidad de los aceros, disminuyen su tenacidad y, sobre todo, en el caso de rehabilitaciones, perjudican la soldabilidad de los aceros, llegando a impedir la soldadura como medio de unión si se encuentran en cantidad suficiente.

El acero se empleó en construcción por primera vez de forma significativa en 1850, en las barras planas que formaban la cadena del puente sobre el Danubio en Viena. Posteriormente, entre 1868 y 1874, se empleó en grandes cantidades en el puente de San Luis sobre el Mississipi y en la fabricación de los alambres para los cables del puente de Brooklyn, comenzado en 1869 y terminado en 1883. Una de las primeras estructuras construidas enteramente en acero, de las que se tiene constancia, es la de la Chocolatería Menier en Noisel sur Marne, según proyecto de Jules Saulnier, realizada en 1872. En ella, todos los esfuerzos están resistidos por la estructura metálica y la fábrica sólo tiene la misión de cerramiento. A finales del siglo XIX, en 1890, se construyó el puente sobre el Firth of Forth, que fue de los primeros en los que se empleó acero en su totalidad y que constituyó el récord de luz durante más de 30 años.

Con posterioridad, se han ido produciendo nuevos avances, se han ido mejorando las técnicas de obtención del acero, se han obtenido otros aceros más resistentes y se han mejorado considerablemente los métodos de inspección.

Una mención especial merece en este apartado, los aceros resistentes a la corrosión o aceros patinables (acero CORTEN). Este acero tiene una sensibilidad frente a los agentes atmosféricos menor que los aceros normales, conservando las demás propiedades. Esta menor sensibilidad se consigue añadiendo en su composición pequeños porcentajes de cobre, fósforo y cromo o níquel. Estos aceros, al quedar expuestos a la atmósfera, se oxidan superficialmente, formando una pátina (de ahí el nombre de acero patinable) que es estanca y que retrasa considerablemente el proceso de corrosión. Para que la pátina sea estable, es preciso que la superficie del acero no esté permanentemente húmeda, sino que deben alternarse períodos húmedos con otros períodos secos. En caso contrario, o en el caso de ambientes marinos o agresivos, el acero patinable se comporta como un acero normal y no forma capa protectora.

1.2. ELEMENTOS

A lo largo de este capítulo nos vamos a referir a todos aquellos elementos utilizados en la composición de una estructura metálica, tanto soportes, sometidos principalmente a compresión, como vigas, sometidas a flexión, como tirantes, sufriendo tracciones, aunque como sabemos la principal ventaja de este material, además de su tenacidad, es la de ser capaz de absorber esfuerzos de todo tipo (compresión, tracción, flexión, cortadura y torsión) con el máximo nivel. En cualquier caso, los elementos más representativos a tener en cuenta son:

1.2.1. Soportes

Resueltos en un principio mediante “columnas” de fundición y actualmente, bien con perfiles laminados simples (I, H) bien con combinaciones de perfiles (2U, I + 2T, etc.) o combinaciones de palastros hasta obtener la sección más adecuadas a las necesidades funcionales y estructurales.

Actualmente, y para soportes de cargas pequeñas, se usan también perfiles tubulares, tanto circulares como cuadradas o rectangulares. Pueden sufrir todo tipo de procesos patológicos, tanto del material como por los esfuerzos a los que se ven sometidos.

1.2.2. Vigas y viguetas

Resueltas mediante perfiles laminados en T ó I, por mejor aprovechamiento de la capacidad de sus extremos (alas).

Su disposición en horizontal y su contacto probable con materiales alcalinos (sobre todo viguetas de forjados) hacen que estos elementos sean muy susceptibles

de sufrir procesos patológicos de tipo químico. Esto, unido a la combinación de esfuerzos de flexión, cortante y posible torsión, hace de este tipo de elementos los más conflictivos de las estructuras metálicas.

1.2.3. Formas trianguladas

Elementos más actuales (de 2ª generación) en donde se persigue un mejor rendimiento del material a base de triangular el conjunto mediante barras, unas a tracción y otras a compresión, que permiten además aligerar el conjunto.

Se obtienen por combinación de perfiles laminados para todas las piezas, o sólo para las sometidas a compresión, y barras y cables para las de tracción. El problema fundamental de estas estructuras está en las uniones, en gran número, que tienen que funcionar como articulaciones, aunque muchas veces resultan empotramientos por facilidad de ejecución, complicándose los esfuerzos que en ellas aparecen, tanto por esos esfuerzos como por la posible corrosión por aireación diferencial o, incluso, por par galvánico. Los procesos patológicos se concentran en los nudos, mientras que en las barras se reduce a la posible corrosión por condensación superficial dada la ubicación de estos elementos en altura.

1.2.4. Tirantes

Elementos metálicos más antiguos utilizados en estructuras (tirantes de arcos) y resueltos tradicionalmente por barras de todo tipo (fundición, acero templado, etc.) y actualmente, tanto con esas mismas barras como mediante perfiles laminados o sus combinaciones, como, más modernamente, por medio de cables rígidos y flexibles.

Al estar sometidos exclusivamente a tracción, no suelen presentar problemas mecánicos en sus partes centrales, a menos que falle el cálculo, pero sí lo pueden hacer en sus uniones al resto de la estructura, donde pueden aparecer procesos químicos de todos los tipos.

1.3. SISTEMAS Y TÉCNICAS DE UNIÓN

Comoquiera que los elementos utilizados en las estructuras metálicas son de producción industrial, normalmente con severos controles de calidad, es lógico pensar que los procesos patológicos que puedan aparecer lo harán sobre todo en las operaciones realizadas en obra durante el montaje, es decir, en las uniones entre los distintos tipos de elementos, algunas de las cuales resultan ciertamente complejas. Por ello consideramos necesario recordar brevemente las distintas técnicas

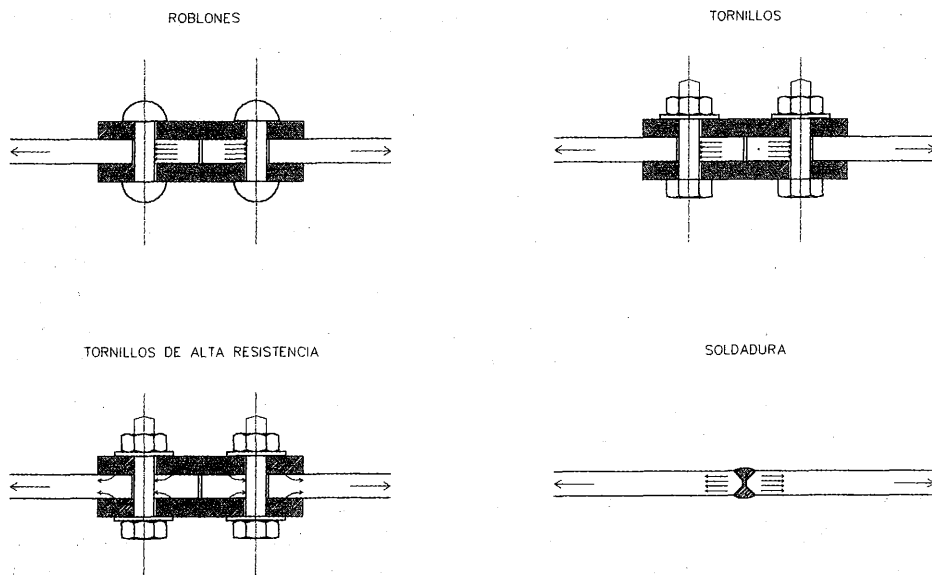


Fig. 5. 1. Técnicas de unión.

de unión y los problemas que pueden presentar. Consideramos cuatro tipos de uniones: roblonado, atornillado, soldadura y anclaje.

1.3.1. Roblonado

Constituye la técnica de unión de piezas metálicas más antigua y actualmente en desuso, sin embargo, la podemos encontrar con frecuencia en las actuaciones de rehabilitación de edificios anteriores a 1940.

Su funcionamiento se basa en la resistencia del roblón al esfuerzo cortante perpendicular a su sección, que le introducen las dos piezas que une al intentar moverse en sentidos opuestos. Al mismo tiempo, aparecen compresiones puntuales en las piezas que se unen que pueden provocar alabeos e, incluso, desgarró.

Desde el punto de vista mecánico, se deberán dimensionar correctamente las secciones necesarias en roblón y chapa a unir, así como el número de roblones. Con el tiempo, y en función de la variación de los esfuerzos, se puede producir cierta holgura en las uniones que puede llegar a provocar la fatiga del roblonado, además de deformaciones generales en la estructura.

Desde el punto de vista químico, el mayor problema lo presenta la corrosión que por aireación diferencial puede aparecer en los múltiples encuentros y que podría

llegar a producir una disminución de la sección útil de los roblones. Otras veces, sin embargo, esa corrosión provoca una especie de soldadura del conjunto que ayuda a rigidizarlo.

1.3.2. Atornillado

Solución alternativa al roblonado que, con el mismo tipo de funcionamiento constructivo (cortante, aplastamiento puntual, etc.) permite resolver uniones practicable que posibilitan el montaje y desmontaje de las estructuras. Sigue siendo un tipo de unión vigente, mejorada con respecto a las primitivas en lo que se refiere a la calidad de los tornillos utilizados (aceros de alta resistencia con límite elástico superior a 10.000 kp) así como a las técnicas de apriete de las tuercas (llaves dinamométricas reguladas eléctricamente).

Los procesos patológicos susceptibles de aparición son similares a los comentados para el roblonado, tanto los mecánicos como los químicos por corrosión, sobre todo teniendo en cuenta que la utilización de aceros de distinta composición podría provocar, incluso, problemas de par galvánico. Exigen, por tanto, controles de calidad exhaustivos, tanto de su cálculo como de los materiales utilizados como, en especial, de su colocación (sobre todo apriete).

Dentro de este tipo de unión debemos considerar también las “articulaciones”, de gran uso actual y que permiten transmitir sólo esfuerzos axiales (compresiones y tracciones) lo que resulta fundamental en estructuras trianguladas y en todas aquellas donde se quieran limitar los esfuerzos de flexión. Cabe mencionar dos tipos básicos; las que funcionan mediante un pasador que une entre si las cartelas provenientes de los distintos elementos a unir, trabajando a esfuerzo cortante, y las de vástago extremo en la misma dirección del elemento, atornillado a éste (solución tipo “MERO”) que se engancha gracias a la helicoide del tornillo.

En cualquiera de los casos, los problemas patológicos son similares a los descritos anteriormente, aunque agravados ahora por la necesaria movilidad de la unión, que puede provocar la fatiga del pasador o del vástago y que obliga al uso de aceros de alta resistencia, así como a un control exhaustivo de calidad del elemento y de su colocación.

1.3.3. Soldadura

Supone la solución más adecuada y fiable para uniones permanentes y su aparición a principios del siglo XX propició el gran desarrollo de las estructuras metálicas hasta alcanzar los niveles de uso actuales. Su gran aportación fue la posibilidad de asegurar la continuidad de esfuerzos entre las piezas que se unen gracias a la continuidad del propio material, lo que da como resultado que se produzcan básicamente empotramientos, además de necesitar juntas de dilatación más próxi-

mas para permitir los inevitables cambios dimensionales.

Existen dos tipos de soldadura según su ejecución, con o sin material de aportación.

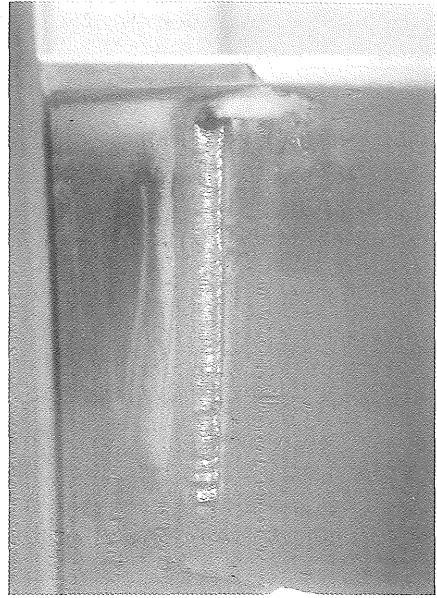
En la primera, la más utilizada en estructuras de edificios, cuando se aporta material se trata de un metal distinto a los que se sueldan, y se suele hacer por medio de un electrodo, conociéndose como **“soldadura por aleación”**. Cuando, por el contrario, no se aporta material, la soldadura se consigue fundiendo por calor los dos cuerpos metálicos a unir, que deben ser de igual naturaleza para que se mezclen bien uno con otro, de tal manera que al enfriarse formen un todo único. Se le conoce como **“soldadura autógena”**. El material que se aporta a partir del electrodo, tiene que ser compatible con el acero de las piezas a soldar y debe de distribuirse uniformemente para conseguir que el espesor del cordón de soldadura se mantenga lo más constante posible y no aparezcan en su sección burbujas de aire, para lo cual es básico ejecutarlo en varias capas o pasadas.

En el segundo caso, sólo utilizado puntualmente, resulta importante comprobar también la soldabilidad de los aceros a unir, esta vez entre ellos. También aquí es fundamental asegurar la uniformidad de la unión, así como la ausencia de burbujas de aire.

En definitiva, debemos realizar un doble control. Por una parte, el de los materiales a unir, incluso el de aportación, para asegurar la soldabilidad de los mismos. Por otra, el de la ejecución en cuanto a espesor y uniformidad de la propia soldadura.

La unión puede sufrir dos tipos de procesos patológicos. Los mecánicos, que serán consecuencia, bien de la insuficiente sección de cálculo, bien de su ejecución poco uniforme, con excesivos estrangulamientos. Los químicos, que se deberán normalmente a la incompatibilidad de los aceros a unir, entre sí, o con el material de aportación.

Hay que tener en cuenta, además, que el proceso de soldadura puede aportar debilitación en la unión por dos razones. Si las piezas a unir son de poca sección, el calor de la soldadura las debilita y provoca alabeos puntuales que pueden introducir tensiones importantes al enfriarse. Por ello, en estos casos se procede a la soldadura por puntos separados y alternados con objeto de no provocar el sobrecalentamiento de las piezas. Por otro lado, ese mismo calentamiento acelera el proceso de oxidación de las partes a soldar, lo que exige una protección antioxidante local una vez terminada la soldadura.



5. 1. Cordón de soldadura.

1.3.4. Anclajes

Nos referimos a un sistema relativamente moderno de unión a tracción, sobre todo para el atado de cables metálicos a elementos pétreos o de hormigón, aunque en algunas ocasiones también se utilizan entre piezas metálicas. La unión se consigue por apriete del cable sometido a tracción mediante el uso de piezas especiales, normalmente de forma troncocónica, que al aparecer la tracción, por desplazamiento, tienden a sujetarlo e inmovilizarlo.

Los aceros utilizados son también de alta resistencia y los procesos patológicos pueden aparecer, como siempre, por las dos vías mecánica y química. Desde el punto de vista mecánico, se puede producir el aplastamiento, e incluso la cizalladura del elemento sometido a tracción, con su inevitable rotura. Además, suele producirse un alargamiento diferido que conviene comprobar en los primeros meses de vida.

Desde el punto de vista químico, el elevado número de uniones facilita la inevitable corrosión por aireación diferencial, lo que induce al uso de elementos de acero inoxidable o, de lo contrario, muy protegidos contra la oxidación.

En definitiva, necesitamos como siempre un correcto cálculo de secciones, una esmerada ejecución y puesta en carga, y un mantenimiento periódico para asegurar su funcionalidad.

2. PROCESOS PATOLÓGICOS

Como afirma R. Martínez Lasheras refiriéndose a las estructuras metálicas, *“es prácticamente imposible que una estructura esté perfectamente construida y no tenga defectos”*. Cuando además se trata de estructuras metálicas que se han dimensionado con unos coeficientes de seguridad relativamente bajos por tratarse de materiales y elementos con altos controles de fabricación, la presencia de defectos de proyecto o de ejecución resulta más alarmante.

Por otra parte, dentro de las causas indirectas, no debemos contemplar sólo los errores de diseño y ejecución, sino también los de fabricación, a pesar de los controles mencionados, lo que hace que estudiemos los procesos patológicos en dos apartados, los relativos al material y los debidos al proyecto y ejecución. Veamos:

2.1. RELATIVOS AL MATERIAL

Como hemos visto, el acero usado en la construcción es un material tenaz y elástico a la vez. Esa elasticidad hace que se produzca una importante deformación que “avisa” antes de llegar a la rotura, por lo que se puede entender que disponemos de una “reserva de seguridad” ante un proceso patológico. Sin embargo, existen algunos defectos que conviene enumerar.

2.1.1. Rotura frágil

Hay casos en que un acero rompe “sin avisar” con un comportamiento frágil, es lo que se llama rotura frágil.

Aparece generalmente en las piezas de fundición pues este es un material básicamente frágil, pero también ocurre en algunos aceros, sin que existan criterios claros que permitan definir el “límite de fragilidad” de los mismos. Únicamente disponemos del anejo nº 1 de la NBE-EA, en donde se hace una relación de las circunstancias y causas que pueden llevar a este tipo de rotura. A él remitimos.

2.1.2. Rotura por fatiga

Aparece cuando el material en cuestión está sometido a esfuerzos variables en el tiempo. Martínez Lasheras la define como *“el proceso de modificación permanente, localizada y progresiva de un metal hasta su rotura total o parcial como consecuencia de la repetición de esfuerzos que producen tensiones inferiores al límite elástico”*.

El proceso patológico en sí se inicia con anomalías superficiales (ángulos entrantes, entalladuras o inclusiones) que provocan fisuras que se propagan hacia el inte-

rior del espesor del material, consiguiendo reducir su sección resistente hasta que ésta es incapaz de resistir los esfuerzos aplicados, rompiendo bruscamente.

Aunque el proceso es progresivo, la rotura se produce sin aviso previo de plastificación de la sección, ya que la fisura es difícil de detectar, de ahí su peligrosidad. Comoquiera que la mayoría de los elementos estructurales sufren variación de esfuerzos, podría pensarse que este tipo de rotura es general. Sin embargo, para que aparezca es preciso que el número de variaciones y su valor sea muy elevado.

2.1.3. Desgarro laminar

Defecto específico de elementos estructurales soldados cuando aparecen deformaciones en la misma dirección del plano de las capas de soldadura, como consecuencia de la retracción del material de aportación, llegando a provocar una rotura frágil de la unión. De hecho, las deformaciones producidas por esa retracción pueden ser muy superiores a las correspondientes al límite elástico del material base del elemento y, por supuesto, a las producidas por las cargas exteriores. Por otra parte, al tener el metal de aportación un límite elástico superior al del metal base, las deformaciones se concentran en éste que, además, tiene una elevada ductilidad en las direcciones longitudinal y transversal, pero pequeña en la perpendicular al laminado. Todo ello facilita el desgarro laminar. (Fig. 5.2)

La sección de la rotura suele ser escalonada tendiendo a la horizontal aunque con una forma irregular, ya que las inclusiones en el perfil laminado están distribuidas también irregularmente y ellas son causa fundamental de la aparición del fenómeno. Esta rotura se da, sobre todo, en uniones con un gran volumen de aportación de metal y con piezas perpendiculares (unionen en T, en esquinas y en cruz).

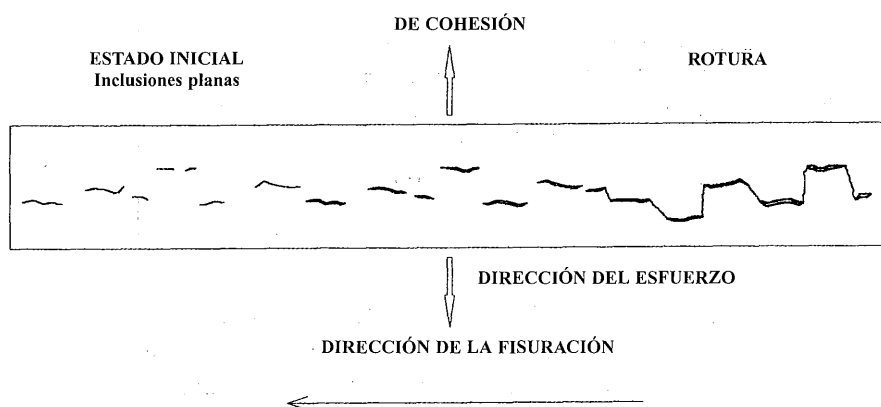


Fig. 5. 2. Desgarro laminar.

2.1.4. Corrosión

Es el tipo de lesión más conocida y fácilmente detectable del acero, aunque no la más peligrosa, ya que afecta sólo a la superficie de los elementos metálicos y, por tanto, “avisa” con tiempo suficiente. Como sabemos, se trata de un proceso químico por el que el metal se va deteriorando superficialmente, perdiendo material y, por tanto, disminuyendo su sección. Ello hace que sea importante un estudio de la pérdida de sección o, mejor dicho, de la sección que permanece, con el objeto de saber la viabilidad de su recuperación como elemento estructural.

El fenómeno de la corrosión puede tener distintos orígenes, que conviene recordar sucintamente:

A) Corrosión por oxidación previa. La producida como consecuencia de la oxidación superficial de la pieza al estar desprotegida y en contacto con el oxígeno del aire, proceso, por otra parte, natural y consecuencia de la inestabilidad propia de los metales en estado puro.

Este óxido superficial, al humedecerse se convierte en hidróxido que resulta ser más electropositivo (cátodo) que el hierro que queda debajo (ánodo). Se establece así un par electroquímico que hace perder electrones al ánodo que, por tanto, se corroe. Esta corrosión puede ir avanzando hacia el interior, disminuyendo progresivamente la sección de la pieza.

Es la más general y se da, obviamente, en elementos estructurales que permanecen al exterior, o sobre los que se condensa la humedad ambiente, de locales húmedos, que provoca primero la oxidación y después la corrosión. Suele ser muy uniforme. También puede aparecer puntualmente en partes del elemento en contacto con yeso que, como material higroscópico, le aporta la humedad que obtiene del aire.

B) Corrosión por par galvánico. Se produce como consecuencia del contacto de la pieza afectada con otro metal de carga eléctrica más positiva, como el zinc o el aluminio. Suele ser puntual a partir de las zonas de contacto y la encontramos, sobre todo, en elementos de fachada o próximos, donde se localizan piezas de esos otros metales. Aparecen además en zonas próximas a los cordones de soldadura, según su disposición (fig 5.3)

También puede darse par galvánico en contacto con los álcalis del cemento o con algunos ácidos contenidos en ciertas maderas. Sigue siendo un fenómeno puntual y, en cualquier caso, necesita la presencia del agua como electrolito del par.

C) Corrosión por aireación diferencial. Se produce cuando existen zonas del elemento metálico que permanecen húmedas durante más tiempo que

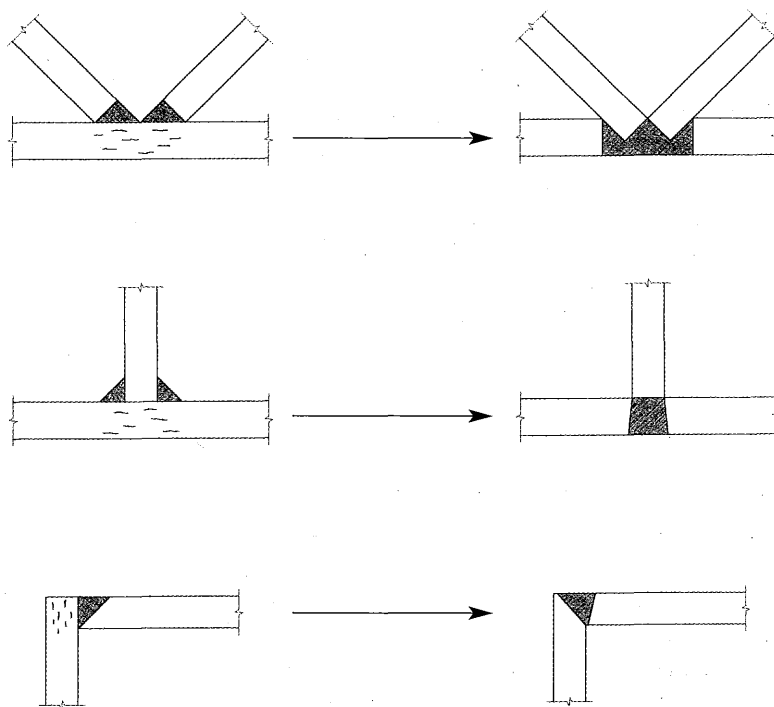


Fig. 5. 3. Corrosión electroquímica en uniones soldadas y recomendaciones para evitarla, según Martínez Lasheras.

el resto. Entonces, unas zonas adquieren una carga eléctrica más negativa y se forma una pila electroquímica con las partes secas adyacentes, perdiendo electrones en favor de éstas y corroyéndose.

Es un fenómeno también puntual y típico de arranques de pilares exteriores que permiten la acumulación de agua en su base, así como de encuentros entre piezas que forman ángulos agudos que retienen el agua más tiempo. Puede aparecer simultáneamente con la de oxidación previa.

D) Corrosión por inmersión. Se presenta en piezas o partes de ellas, que están permanentemente húmedas. Se forma una capa de hidróxido al ionizarse que, según el pH del agua, puede disolverse provocando una pérdida progresiva del material (corrosión). Es típica de estructuras enterradas y sumergidas, y suele afectar por igual a toda la superficie que se encuentre en esas condiciones.

2.2. RELATIVOS AL PROCESO

Nos referimos ahora al conjunto de causas indirectas, en forma de errores, que se

pueden introducir en cada una de las fases del proceso de obtención de una estructura metálica y que redundan en facilitar la aparición de los correspondientes procesos patológicos. Para conocerlos, analicemos esas fases, a saber, proyecto, ejecución (transformación y montaje) y mantenimiento.

2.2.1. Errores de proyecto

A) Errores normativos. Previos a los errores que puede cometer el proyectista, cabe considerar los que provienen de la propia normativa. Aunque ésta no puede cubrir toda la casuística y, por tanto, siempre podremos encontrar situaciones “anormales”, sin embargo existen algún aspecto que está insuficientemente normalizado. No es éste el sitio para discutir esos aspectos, pero si podemos mencionar, de acuerdo con Martínez Lasheras, la insuficiente definición de los estados límites.

Entre estos casos se puede citar la limitación de los desplazamientos horizontales de las estructuras, que se dejan al criterio de los proyectistas, excepto en algunos casos concretos, como vigas carril de puentes-grúa o torres de comunicación hertzianas. El no limitarlos no suele acarrear accidentes catastróficos, pero puede dar origen a problemas importantes, como vibraciones de edificios de gran altura por la acción del viento o rotura de cerramientos por deformaciones de la estructura producida por los temporales, el viento, etc.

Tampoco existe ninguna limitación de los estados límites de vibración y de durabilidad, entendiendo ésta como protección de la estructura metálica.

Dentro del estado límite último de estabilidad, tenemos el caso de abollamiento del alma producida por la aplicación de cargas concentradas. Las normas actualmente en vigor, contemplan el fenómeno del abollamiento producido por los esfuerzos internos (axil, flector, cortante) y prescriben que “*se colocarán rigidizadores transversales en las secciones de apoyo y en todas aquellas en que actúen cargas concentradas*”. Sin embargo, no consideran el fenómeno del abollamiento del alma producido por cargas concentradas móviles, como en el caso de las vigas-carril o el producido por cargas cuasi-concentradas, aplicadas en las zonas de las vigas comprendidas entre rigidizadores transversales.

B) Errores de proyecto. En cuanto a los errores de proyecto propiamente dichos, pueden aparecer en dos partes; errores de dimensionado y errores de documentación.

B-1) Errores de dimensionado. Entre los primeros, podemos encontrar equivocaciones por lo menos, en los siguientes apartados:

- *Hipótesis de cálculo*, que afectan a cualquier tipo de estructura y que, en el caso de las metálicas, tiene especial importancia por su tipo de trabajo o su diseño. Así podemos indicar algunos ejemplos como no tener en cuenta, en las uniones angulares, el momento flector existente en la sección de los ejes de los tornillos, o el adoptar un coeficiente de rozamiento inadecuado de apoyo de la estructura, o dimensionar con vigas alveoladas como si fueran de alma llena, sin tener en cuenta los esfuerzos de flexión locales por efecto de los cortantes, o los soportes empesillados, solicitados además a flexión, sin tener en cuenta el esfuerzo cortante existente y que se debe sumar al esfuerzo cortante ideal, etc.
- *Cálculo numérico*, también general y que, aparte de los propios errores en las operaciones o en los programas informáticos, no siempre adecuados, nos pueden surgir en dos casos muy concretos que afectan especialmente a las estructuras metálicas; por un lado, la errónea estimación de la esbeltez de pandeo, y por otro, la ausencia de comprobación de los estados límites.

Con respecto al **pandeo**, podemos mencionar tres casos concretos de errores tipo:

- Considerar como luz de pandeo del cordón superior de una cercha la distancia entre correas en lugar de la que hay entre nudos.
- Equivocarse en la elección del plano de pandeo en los perfiles angulares cuando se colocan con una de sus alas paralelas al plano de la estructura. En estos casos, el plano del radio de giro mínimo no coincide con ninguno de los paralelos a sus alas. (Fig. 5.4)
- No diseñar los puntos de arriostramientos suficientemente fijos para que se puedan considerar como tales a los efectos de longitud de pandeo.

Con relación a los **estados límites** y al margen de lo mencionado más arriba al hablar de normativa, ésta exige que la estructura se compruebe para todos y cada uno de los estados límites que le pueden afectar. Esta comprobación no se debe limitar sólo a los valores numéricos, sino que debe abarcar también las disposiciones constructivas. En este sentido, dentro del estado límite de estabilidad, no es preciso efectuar normalmente la comprobación de pandeo lateral de vigas en las estructuras de edificios porque la cabeza comprimida suele estar arriostrada por el forjado. Pero en ciertos casos no es así y puede producirse el fenómeno, como en el de los voladizos, en el que el ala comprimida es la inferior y no está, por tanto, arriostrada, o cuando el forjado no sujeta adecuadamente el ala comprimida. (Fig. 5.5)

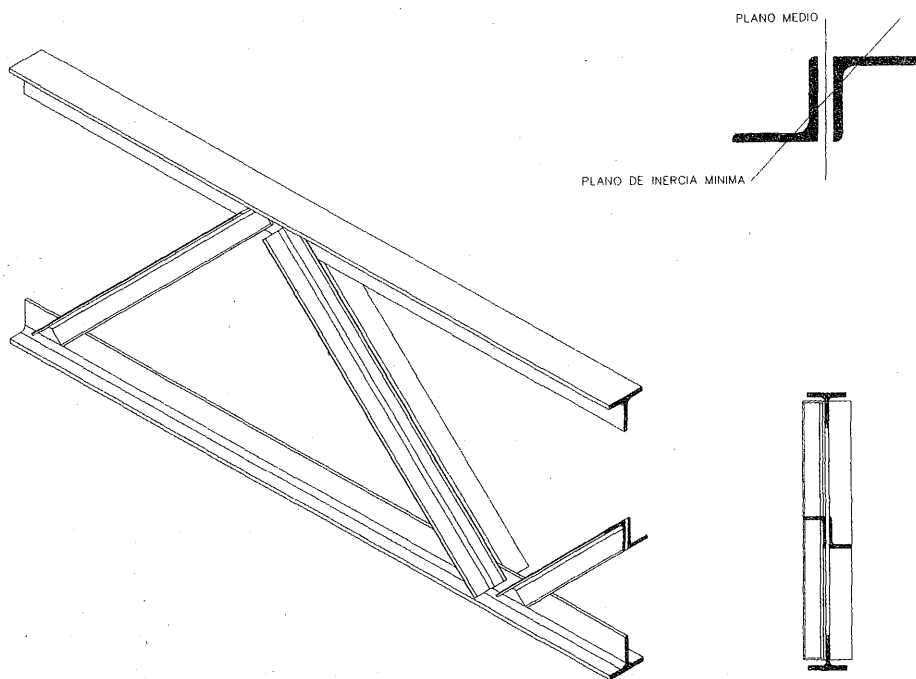


Fig. 5. 4. Errores de proyecto: plano de pandeo.

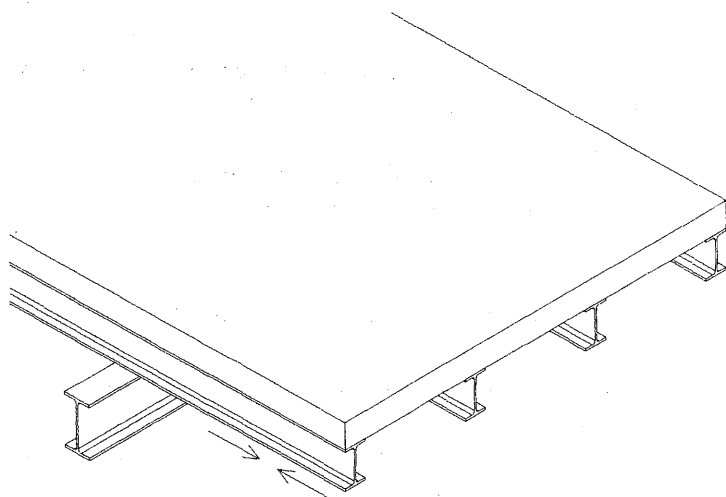


Fig. 5. 5. Errores de proyecto: ala comprimida.

- *Cálculo de uniones*, ya que éstas son uno de los puntos más delicados del proyecto de estructuras metálicas y tienen por misión dar continuidad al elemento estructural que no puede ser transportado o construido en una pieza, o materializar las hipótesis efectuadas en los cálculos. Por ello, son fundamentales para la estabilidad y seguridad de la estructura y debe ser el propio proyectista el que las diseñe y calcule sin descargar este trabajo en el constructor, no sólo porque es su obligación como tal, sino también porque en numerosos casos el constructor, o su personal, no está capacitado para ello.

B-2) Errores de documentación. Englobamos aquí todos los que se puedan incorporar en los documentos que permiten transmitir el proyecto al agente que debe ejecutar la estructura, desde la ausencia de tal proyecto hasta su insuficiencia. Esto, que es problemático en cualquier tipo de estructura, cobra especial importancia en el caso de las metálicas donde confluyen dos hechos importantes.

Por un lado, al tratarse de elementos predeterminados, se necesita una manipulación de taller que requiere una ejecución precisa. Por otro, se basa en elementos de tipo industrial que, por su control de fabricación, parecen más seguras y cualquier “cerrajero” se considera capaz de ejecutarla aun sin la ayuda de planos. Así pues, es importante insistir en la existencia de una documentación de proyecto previa que sea completa. En este sentido, cabe recordar algunos aspectos importantes:

- *Definición correcta de las uniones* de tal forma que permitan realizar el ensamblaje de la estructura. Aunque puede parecer obvio, en muchos casos se proyectan uniones que, satisfaciendo todas las prescripciones, no son realizables, o son tan difíciles de realizar que pueden albergar serias dudas sobre su calidad.
- *Definición suficiente de las condiciones de estabilidad general* de la estructura y de su relación con los cerramientos del edificio, máxime cuando estos colaboran con el arriostramiento.
- *Pliego de condiciones específico*, tanto del material, como de su fabricación en taller, como de su montaje en obra; su ausencia puede provocar defectos de ejecución. En este sentido, un defecto puntual aparece cuando se emplea el punzonado en lugar del taladro para realizar los agujeros de tornillos. Si el acero es “agrio”, los espesores grandes y las cargas dinámicas, el punzonado puede inducir a la rotura frágil si la temperatura ambiente es baja y, desde luego, rebaja considerablemente la resistencia a fatiga del elemento estructural correspon-

diente, porque produce desgarramientos en los bordes de los agujeros desde los cuales comienza a propagarse la fisuración.

2.2.2. Errores de ejecución

Dentro de este apartado consideramos a su vez dos escalones; fabricación y montaje.

En la **fabricación** se pueden cometer, por lo menos, los siguientes tipos de errores:

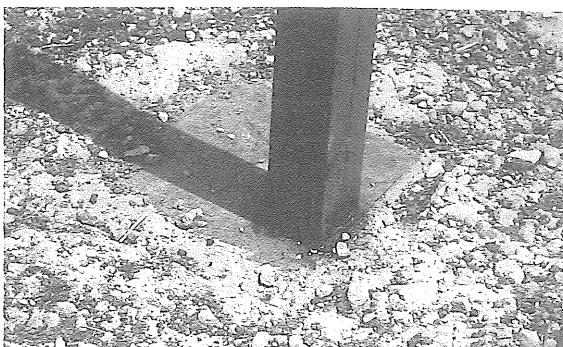
- *Divergencia con respecto a los planos*, bien por los tipos de perfiles o por la solución de las uniones.
- *Dimensiones fuera de tolerancia*, lo que redundará en problemas en el montaje, tanto por la dificultad de acoplado como, sobre todo, por las operaciones de conexión efectuadas “in situ”, como forzar la geometría de las piezas, agrandar agujeros con soplete, etc, que quedan fuera de control.

En el **montaje**, donde se ejecuta finalmente la estructura, es donde se producen los mayores problemas (1/3 de los accidentes, según las estadísticas). En los casos especiales suelen ser necesarios planos específicos de montaje.

Debemos considerar, por lo menos, los siguientes:

- *Montaje no conforme a planos*, realizado sin materializar adecuadamente las condiciones de sustentación de la estructura, o sin colocar todas las piezas de la estructura, o equivocando las posiciones de las barras.
- *Montaje fuera de tolerancia*, debido a defectos, tanto de replanteo durante el montaje como de fabricación. Pueden ser peligrosos, no sólo por el incremento de esfuerzos que se produzcan, sino también porque se intentará ocultar este defecto subsanándolo con medios, muchas veces perjudiciales para la estructura.
- *Estabilidad insuficiente*, ya que la estructura no es, en general, estable hasta que se haya construido totalmente; mientras tanto precisará de elementos de arriostramiento que, en muchos casos, no están correctamente dimensionados o realizados.
- *Falsas maniobras*, que se producen con relativa frecuencia y son imprevisibles. Es un error grave porque no se detecta hasta que se ha producido.

5.2. Colocación errónea de pilar metálico sobre placa de anclaje.



- *Soldaduras incorrectas*, uno de los errores más frecuentes, que se puede presentar con diversos síntomas:

- Sección insuficiente, en función del espesor de las piezas y de la tensión a resistir.
- Burbujas internas.
- Fisuras.
- Falta de homogeneidad.

2.2.3. Errores de mantenimiento

Finalmente, dentro del proceso general de las estructuras metálicas debemos considerar también la incidencia de su mantenimiento que, por el tipo de material de que se trata, así como por lo reducido de los coeficientes de seguridad, requiere que su uso se ajuste lo más posible al previsto en proyecto. En este sentido cabe mencionar tres fallos en el uso y mantenimiento que pueden provocar procesos patológicos:

- *Aumento excesivo de cargas*, que dada la elasticidad de este tipo de estructuras, provoca flechas y pandeos exagerados que pueden producir deformaciones y grietas en los cerramientos y acabados del edificio.
- *Alteraciones de la estructura o de alguno de sus elementos*, como pueden ser cortes, uniones de piezas ajenas a la misma (carteles, instalaciones, etc.) que pueden alterar, tanto el funcionamiento del elemento como su resistencia a las acciones atmosféricas, sobre todo al perder la protección antioxidante inicial o al facilitar acumulaciones excesivas de agua.

- *Mantenimiento insuficiente*, que debe incluir, tanto una inspección periódica para comprobar su funcionalidad constructiva, como la reposición de la protección anticorrosiva en elementos en contacto con la intemperie. El cumplimiento de este mantenimiento facilita la prevención; su ausencia pone en peligro su funcionalidad.

2.3. SÍNTOMAS

De todo ese conjunto de procesos patológicos y sus posibles causas resultan una serie de síntomas a partir de los cuales detectamos el proceso lesivo e iniciamos los estudios necesarios para alcanzar el diagnóstico que nos permita proceder a su reparación.

Aunque el conjunto de causas puede ser bastante variado, como hemos visto, sin embargo los síntomas resultan ser más limitados en número, toda vez que tienden a repetirse de unos procesos a otros. Así, cabe distinguir básicamente dos tipos; los que afectan al material y los que lo hacen al elemento.

Los primeros se resumen en dos; **corrosión superficial**, que engloba la simple oxidación, y **fisuración**, que recoge también al desgarró laminar. Una vez detectado cualquiera de ellos, se llevarán a cabo los estudios necesarios para conocer cual sea concretamente el proceso patológico y su origen, de acuerdo con lo indicado más arriba.

En cuanto a los síntomas que afectan al elemento, también podemos agruparlos en dos tipos; deformaciones y roturas. Las **deformaciones** pueden ser, a su vez, globales de uno o varios elementos, tales como flechas con posible cimbreo, pandeos y alabeos, o locales en una parte de los mismos (pandeos y alabeos puntuales). Las **roturas** pueden afectar a la parte intermedia de una pieza o a su unión. En cualquiera de los casos, suelen ser debidas a excesos de tensión o, en las uniones, a defectos de ejecución. En estas últimas, suele romperse el material de aportación bien sea la soldadura, bien tornillos, pasadores o cartelas.

En estos casos y a los efectos de su estudio en el apartado de reparación, cabe distinguir entre estructuras de pilares y vigas, forjados y estructuras espaciales. En las primeras, podremos encontrarnos con todo tipo de síntomas de los cuales las deformaciones no suelen ser peligrosas para la propia estructura, pero sí para los cerramientos y tabiquería que en ella se apoya, que acaba rompiendo. Por el contrario, las roturas, sobre todo de uniones soldadas, si son peligrosas aunque, por suerte, no son frecuentes.

En los forjados aparecerán, sobre todo, problemas de flechas que nos afectarán también a tabiques y cerramientos.

En las estructuras espaciales, aunque con poca frecuencia, pueden aparecer problemas de rotura de uniones que, evidentemente, requieren tratamiento urgente, sobre todo si se trata de anclajes o uniones a tracción.

3. TÉCNICAS DE REPARACIÓN

Analizados los distintos procesos patológicos que pueden afectar a las estructuras de acero, sus posibles causas, así como los síntomas que los detectan, procede ahora estudiar las técnicas de reparación que nos permitan recuperar la funcionalidad constructiva de esas estructuras, o la de los elementos y uniones afectados por esos procesos.

3.1. DIAGNÓSTICO PREVIO

Para ello, y antes de entrar en las propuestas de reparación, hay que recordar la exigencia de alcanzar un correcto diagnóstico con anterioridad a su intervención. Lo contrario podría llevarnos a soluciones erróneas e, incluso, contraproducentes. Este diagnóstico implicará dos partes. Por un lado, una exploración minuciosa de la estructura a reparar y, en particular, de sus elementos resistentes y uniones, sobre todo aquellos puntos susceptibles de sufrir el ataque de humedades. Entre las uniones, principalmente las entregas de vigas y viguetas en obras de fábrica. Con ello podemos detectar los síntomas de deterioro debidos al material, además de las posibles roturas en zonas de unión. Asimismo resulta básico el estudio a fondo del estado de las soldaduras, bien mediante radiografías, si la geometría lo permite, bien mediante líquidos penetrantes, que detectan fisuras y burbujas, además de calibres para comprobar secciones de cordón.

Por otro lado, será necesaria una instrumentación y seguimiento de la movilidad de la estructura, sobre todo en zonas donde se hayan detectado deformaciones de la misma o roturas de los tabiques y cerramientos en ella apoyados. Con esta instrumentación trataremos de cuantificar, por una parte, esas deformaciones, tanto en valor absoluto como en valor relativo, y por otra, conocer su recuperabilidad y, por tanto, el correcto funcionamiento elástico de la estructura. Todo ello, con el necesario complemento de conocer las secciones y perfiles de los elementos que la componen, lo que se logrará, bien con el estudio de la documentación de proyecto, si existe, bien con la observación y realización de calas que, en cualquier caso, nos permitirá contrastar la documentación analizada.

El conjunto de estas actuaciones previas nos posibilitarán la adecuada toma de decisiones en cuanto a las técnicas de reparación a emplear. Para estudiar éstas, sigamos la siguiente secuencia: pilares, vigas, forjados, nudos y material propiamente dicho.

3.2. PILARES

Las lesiones mecánicas más corrientes serán las deformaciones (pandeos y alabeos) provocadas por esfuerzos superiores a su capacidad portante, de ahí que la reparación pasará por un refuerzo con aumento de su sección o de su inercia, según el caso. Dicho refuerzo puede llevarse a cabo de dos maneras; mediante la unión por soldadura de chapas o perfiles, y mediante el hormigonado exterior o interior para convertirlo en un “pilar mixto”. Veamos:

3.2.1. Refuerzo metálico

Consistirá en soldar chapones o perfiles adicionales hasta obtener la sección o inercia requeridas según cálculo.

La operación parece sencilla pero pueden surgir problemas debidos a los efectos de las tensiones residuales provocadas por la soldadura de las nuevas piezas sobre el pilar original, lo que obliga a un procedimiento operativo muy cuidado, así como a un diseño que evite al máximo dichas tensiones. En este sentido cabe recordar que esas tensiones se producen al aportar el metal de soldadura en estado líquido, que posteriormente tiende a contraer, impidiéndoselo el metal de base más frío, resultando éste comprimido y el de aportación traccionado. Esta situación hace que el soporte inicial tienda a deformarse en función de la distancia de las nuevas tensiones con respecto al eje del pilar inicial, así como de su simetría.

En general, pues, deberemos diseñar el refuerzo de tal manera que esas tensiones residuales resulten lo más simétricas posibles con respecto al eje en todas las direcciones. No obstante, en algún caso se puede pensar en aprovechar esas tensiones como “pretensiones a tracción”, en los casos en que el uso posterior del pilar introduzca esfuerzos en el mismo sentido. Entonces, nos interesará que la nueva pretensión quede lo más alejada del eje, para lo que los nuevos cordones de soldadura también tendrán que estarlo. Por otra parte, en la ejecución de dichos cordones se deberá tener especial cuidado para que no tengan excesiva continuidad, ya que ésta aumenta la posible tensión residual.

En cualquier caso, los posibles refuerzos se realizarán, bien con planchones, bien con perfiles en T ó I, según los ejemplos de la figura 5.6. En ellos, habrá que asegurar la posibilidad de imprimir contra la corrosión, tanto antes como después de la unión, por lo que deberemos huir de crear “tubos” o secciones cerradas. En caso de que éstas sean inevitables, hay que proteger previamente los perfiles.

3.2.2. Refuerzo con hormigón

Según el tipo de perfil o sección a reforzar resultan dos opciones. Refuerzo exterior, cuando se trata de un perfil abierto, y refuerzo interior o relleno, cuando se

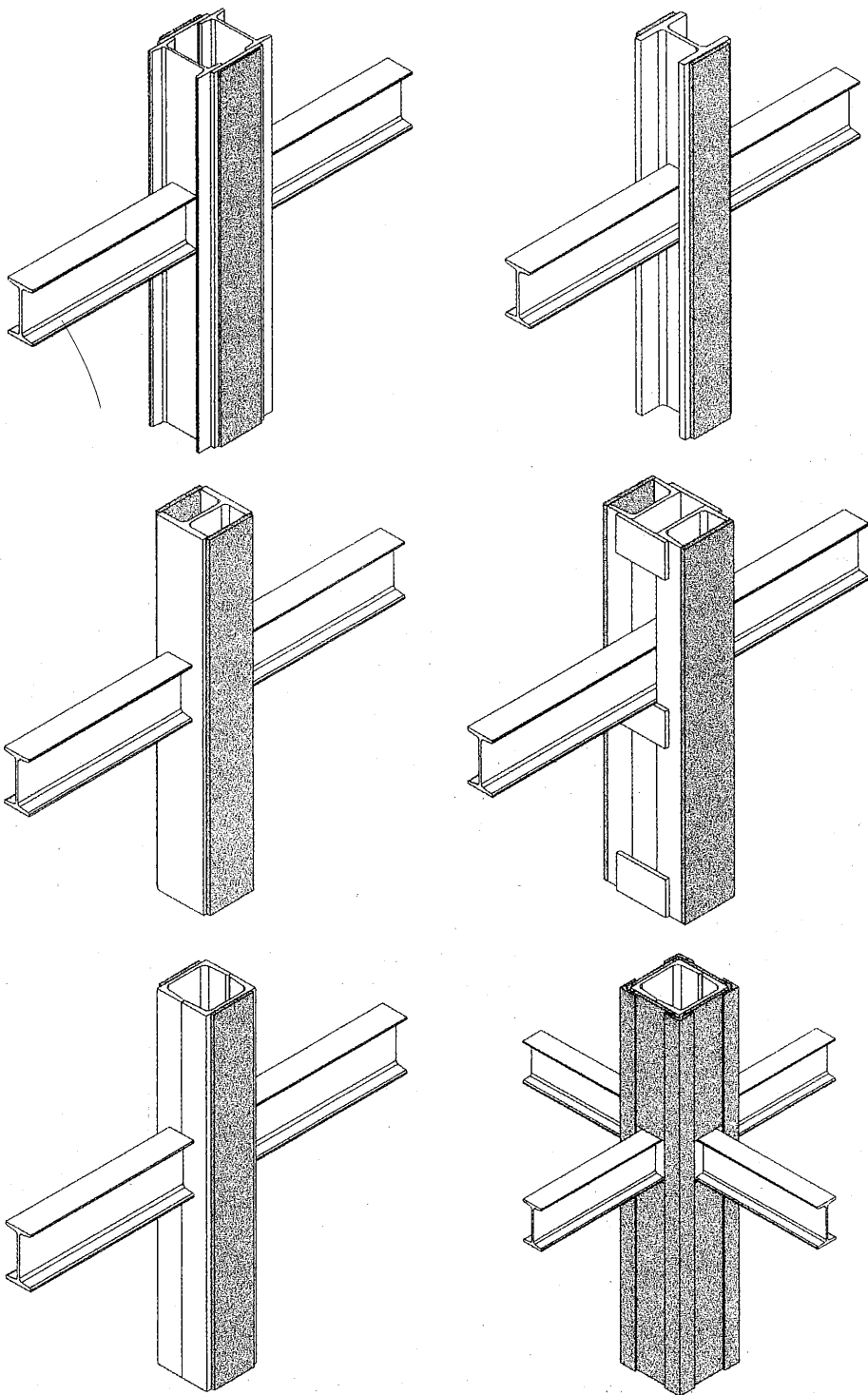


Fig. 5. 6. Refuerzos metálicos de pilares.

trata de una sección cerrada. En el primer caso, nos encontramos con la ventaja adicional de proteger al perfil metálico contra la acción del fuego, por lo que resulta siempre más conveniente, aunque tenga el problema añadido de aumento de sección resultante. En cualquiera de los casos obtendremos un soporte mixto en donde, a efectos del cálculo de su inercia y de su capacidad resistente, deberemos considerar tres elementos básicos; sección del acero estructural inicial (A_s), sección del acero de armar (A_a) y sección del hormigón (A_c), por lo que su comportamiento final estará reflejado, según F. Quintero, en la fórmula:

$$N_p = f_{yd} \cdot A_s + f_{ya} \cdot A_a + 0,85 f_{cd} \cdot A_c$$

donde f_{yd} y f_{ya} son los límites elásticos minorados del acero estructural y del acero de armar, respectivamente; $f_{cd} = f_{ck} / T_c$, es la resistencia de cálculo del hormigón, en función de su resistencia característica y que no debe ser inferior a 200 kp/cm².

La contribución del hormigón a la resistencia total de la pieza puede considerarse según el coeficiente $\alpha_c = 0,85 \cdot A_c \cdot f_{cd} / N_p$, que debe estar comprendido entre 0,2 y 0,8 para que pueda considerarse un pilar mixto.

F. Quintero recomienda además que se consiga un recubrimiento igual o superior a los 50 mm, y que la separación entre cercos no supere los 200 mm, para evitar problemas de pandeo en las armaduras. En este sentido, se puede anclar dicha armadura a la estructura metálica previa mediante horquillas u otros dispositivos

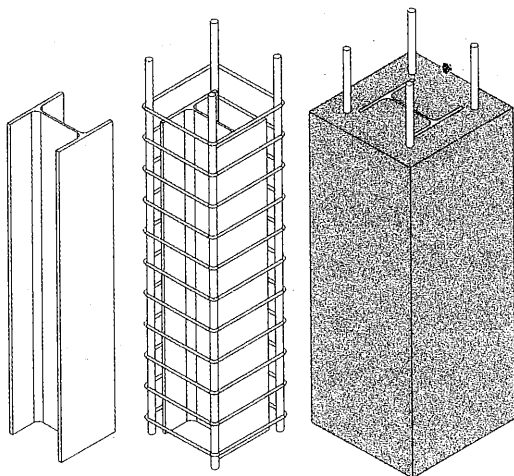


Fig. 5. 7. Refuerzo exterior de hormigón.

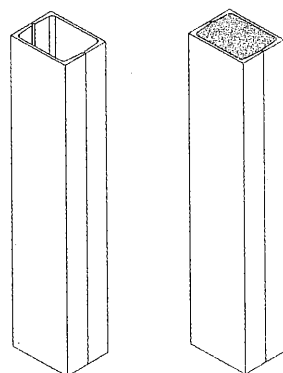


Fig. 5.8. Refuerzo interior.

soldados. Ello contribuye, además, a absorber el esfuerzo rasante que surge entre el perfil metálico y el hormigón, con lo que se asegura la transmisión de cargas al refuerzo. En definitiva, se trata de asegurar la suficiente capacidad portante, así como resistencia a pandeo, en el elemento reforzado, para lo que se deberán realizar los cálculos oportunos y en este sentido remitirnos a los tratados correspondientes.

3.3. VIGAS

De nuevo la lesión más importante será la deformación, en este caso en forma de flecha, que podrá ser debida a la simple deformación elástica del perfil o a una tensión excesiva; en cualquier caso, inadecuada respuesta frente a un estado límite. La solución por tanto, puede ser también única a base de aumentar la capacidad resistente del elemento, lo que pasará por un aumento de su inercia.

3.3.1. Deformación excesiva

Como quedó comentado, esta excesiva deformación tiene dos tipos de consecuencias patológicas; una funcional, en forma de cimbreo o vibraciones, y otra mecánica, grietas y fisuras en los elementos de cerramiento y acabado apoyados sobre la viga. El problema generalizado está en que las normas limitan la flecha en valor relativo y no en valor absoluto, ya que su principal objetivo es que la propia estructura no sufra daños. Sin embargo, esto hace que la deformación aumente según la longitud del elemento, independientemente del tipo de local o de los cerramientos existentes, provocando problemas cuando las luces sobrepasan los 5 m de longitud, ya que las limitaciones altas suelen estar en valores de $L/500$ ¹, lo que nos da flechas por encima de los 10 mm, que generalmente provoca problemas, tanto de cimbreo como de roturas.

La solución, por tanto, estará en limitar la flecha en valor absoluto a tamaños inferiores a los 10 mm, incluso a los 7 mm, cuando la tabiquería sea de LHS, lo que deberemos conseguir aumentando la inercia del elemento.

En cuanto al problema de vibraciones, según F. Quintero podremos atacarlo limitando la presencia de las mismas. En este sentido, dado que la frecuencia del paso humano es del orden de los 2 Hz (dos pasos por segundo) podremos establecer como valor más seguro el de 3 Hz para la viga en cuestión. La fórmula que propone es: $T = 1,75 (f)^{1/2}$, donde T es el periodo fundamental en segundos y f la flecha en metros para la carga máxima. Operando resulta: $f = (T/1,75)^2$ para $T = 1/35$, $f = 3,63$ cm. que nos da una flecha muy superior al límite establecido anteriormente para evitar grietas y fisuras en tabiques y acabados.

(1) La norma NBE/EA establece flechas entre $L/300$ para ménsulas y $L/500$ para vigas apoyadas en muros.

Para salas grandes, sin tabiquería, se recomienda reducir el periodo a $1/5$ s, lo que nos daría una flecha de 1,3 cm.

3.3.2. Tensión excesiva

Además de estos dos problemas que afectan al estado límite de servicio, debemos considerar también la aparición de tensiones excesivas en la viga, lo que puede afectar a su estado límite último. Estas aparecerán en los puntos de momento máximo, sean positivos (centro del vano), sean negativos (empotramientos y apoyos continuos).

Hay que tener en cuenta que probablemente estaremos ante perfiles metálicos con límites elásticos relativamente bajos, del orden de 2.400 kp/cm^2 que, en cualquier caso, deberemos comprobar. A la hora de aplicar los refuerzos con aceros actuales, además de comprobar los posibles problemas de soldabilidad, habrá que tener en cuenta esos distintos valores del límite elástico. Para ello, F. Quintero propone partir de un límite elástico intermedio de 2.200 Kp/cm^2 , y un coeficiente de minoración de 1,25, lo que nos dará una tensión última aproximada de 1.800 Kp/cm^2 que nos deja del lado de la seguridad.

3.3.3. Refuerzos

Los refuerzos a realizar, tanto en uno como en otro caso, tienden a buscar un aumento de la sección resistente que nos da, por un lado, mayor inercia de dicha sección en los puntos más solicitados y por tanto una disminución de la flecha y, por otro, un aumento de la capacidad resistente.

En el primer caso, nos limitaremos al refuerzo del vano central, es decir a las $3/5$ partes aproximadamente. En el segundo, actuaremos en las zonas donde el diagrama de esfuerzos nos pidan el aumento de la sección.

En general, ambos tipos de refuerzos pueden llevarse a cabo de una forma similar a base de soldar longitudinalmente platabandas y perfiles metálicos hasta conseguir la sección más adecuada a las necesidades planteadas. Para ello tenemos multitud de posibilidades entre las que podemos mencionar como más corrientes las que aparecen en las figuras 5.9 a 5.14. Cabe recordar que los refuerzos con chapones en un solo lado no permiten aumentar el módulo resistente del perfil en más de un 20%. Para mejorar esta cantidad hay que recurrir a perfiles.

En cualquiera de los casos se deben tomar una serie de precauciones de carácter general, a saber:

- Descubrir el perfil y conocer el estado real de su sección.

- Realizar los cálculos adecuados para determinar las necesidades de refuerzo.
- Realizar ensayos de deformación, si son necesarios, con variación controlada de cargas y medición previa de las deformaciones.
- Determinar el refuerzo más adecuado en función de las necesidades planteadas y de las posibilidades reales de su ejecución (operabilidad).
- Comprobar la soldabilidad de los perfiles existentes.
- Limpieza profunda de las zonas a reforzar.
- Soldado de los nuevos perfiles evitando la introducción de tensiones residuales por excesiva continuidad del cordón, tal como quedó mencionado en los refuerzos de pilares, aunque en este caso la tensión de tracción que nos aparece tiende a introducir una deformación nueva que provoca una pretensión del elemento más favorable para su trabajo.
- Comprobación de la correcta ejecución de las soldaduras en lo que a espesor de la misma se refiere, mediante radiografías y líquidos penetrantes.
- Imprimación de toda la zona afectada por la unión mediante productos antioxidantes.

Sin intención de entrar en el cálculo de los perfiles resultantes, sí cabe recordar las fórmulas básicas para hacerlo que, según F. Quintero, serían las siguientes de acuerdo con la figura.

$$A = A_1 + A_2$$

$$Y_g = \frac{A_z \cdot (C + T)}{Z \cdot (A_t + A_z)}$$

$$I = I_1 + A_1 \cdot Y_{g2} + A_z \cdot (C/Z + T/Z - Y_g)^2$$

$$W_R = I / C/Z + T - Y_g$$

$$W_{NR} = I / C/Z + Y_g$$

Siendo: A = Sección total resultante

A₁ = Sección del perfil inicial

A₂ = Sección del refuerzo

C = Canto del perfil inicial

T = Complemento del canto de refuerzo

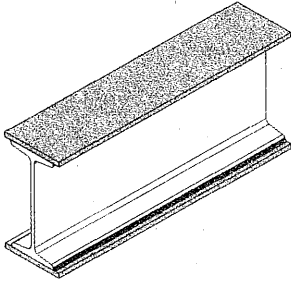
I = Módulo de inercia resultante

I₁ = Módulo de inercia del perfil inicial

W_R = Módulo resistente resultante

W_{NR} = Módulo resistente sin reforzar

CHAPAS SOLDADAS



CHAPAS SOLDADAS SI HAY ELEMENTOS SOBRE LAS VIGAS

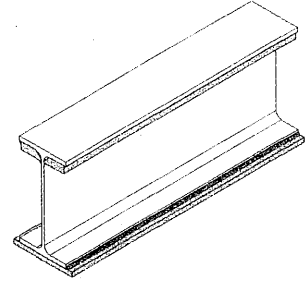
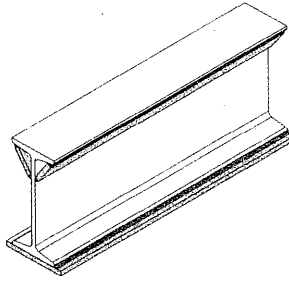
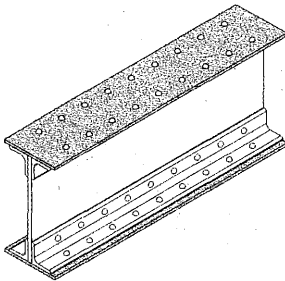
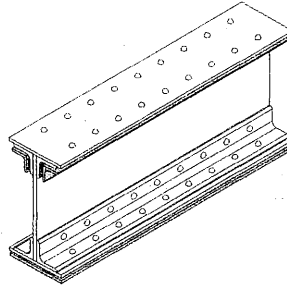


Fig. 5. 9. Refuerzos metálicos de vigas: refuerzos de alas con chapas soldadas.

CHAPAS AÑADIDAS



CHAPA Y PERFILES AÑADIDOS



CHAPAS SUSTITUIDAS

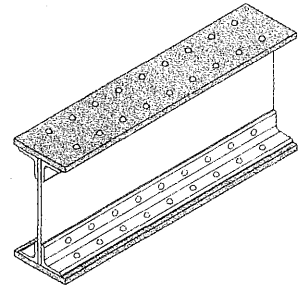
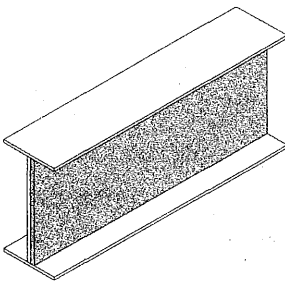


Fig. 5. 10. Refuerzos metálicos de vigas: refuerzos de alas con chapas atornilladas.

CHAPAS SOLDADAS



CHAPAS SOLDADAS SI HAY ELEMENTOS SOBRE LAS VIGAS

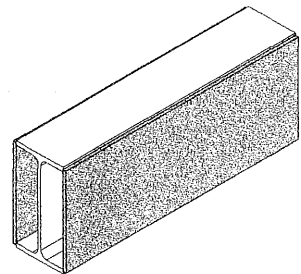
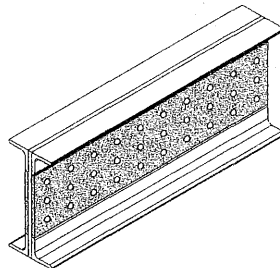
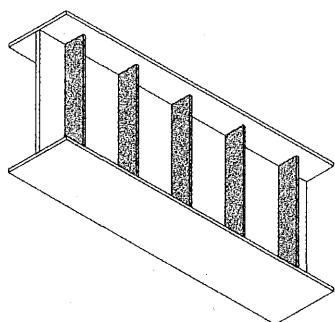


Fig. 5. 11. Refuerzos metálicos de vigas: refuerzos de almas con chapas.

CHAPAS SOLDADAS



PERFILES ATORNILLADOS

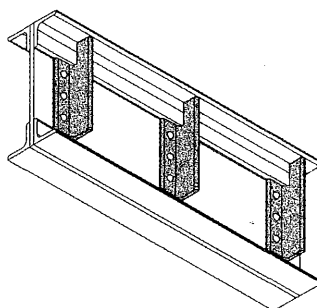
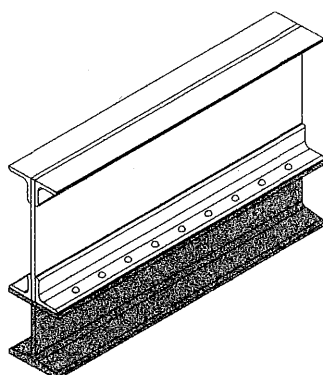


Fig. 5. 12. Refuerzos metálicos de vigas: refuerzos de almas con cartelas.

CHAPA INTERMEDIA ATORNILLADA



T SOLDADA

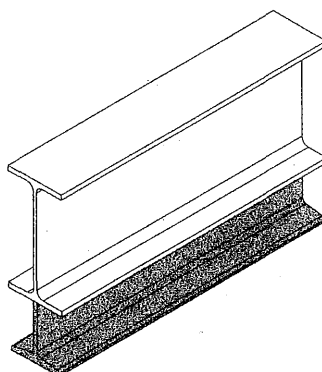
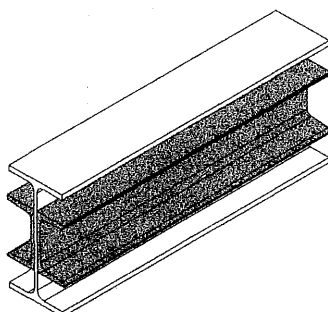


Fig. 5. 13. Refuerzos metálicos de vigas: refuerzos de secciones con perfiles H.

2 UPN SOLDADOS



IPN SOLDADO

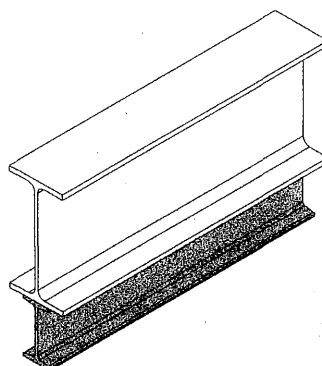
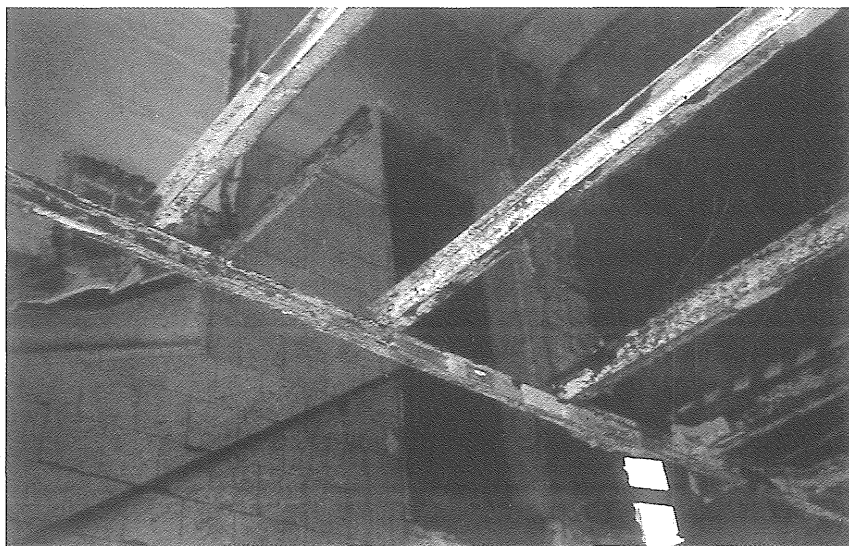


Fig. 5. 14. Refuerzos metálicos de vigas: refuerzos de secciones con perfiles I y U.



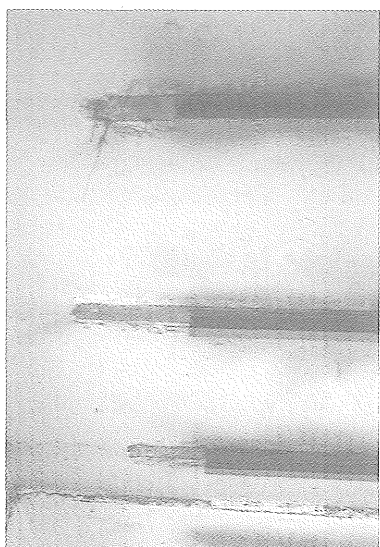
5. 3. Perfiles oxidados de forjado metálico.

3.4. FORJADOS

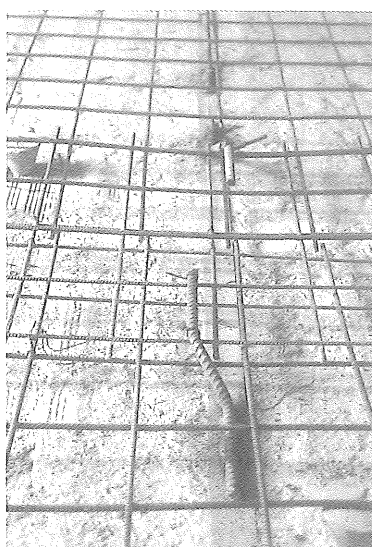
Se trata de un elemento constructivo muy heterogéneo que puede ser resuelto con diversos materiales, más o menos uniformes y de los que a nosotros nos interesa un caso particular, relativamente frecuente en el periodo histórico comprendido entre los años 1920 y 1960, constituido a base de viguetas metálicas de PNI y bovedillas cerámicas, normalmente ejecutadas “in situ” mediante rasillas recibidas con yeso.

Este tipo de forjado, que nos encontramos en numerosas intervenciones de edificios urbanos de esa época, suele presentar básicamente dos tipos de procesos patológicos. Uno mecánico, de flechas excesivas así como grandes vibraciones, y otro químico, de corrosión generalizada como consecuencia del contacto del yeso con el metal y la correspondiente corrosión, así como corrosiones puntuales en habitaciones húmedas como consecuencia de tuberías y bajantes.

El segundo problema lo comentaremos en el apartado correspondiente de este mismo capítulo. En cuanto al primero, las soluciones pasarán por el refuerzo de la sección que nos de mayor inercia y, si resulta necesario, mayor capacidad resistente, al igual que hacíamos para las vigas. Ahora se nos plantean dos alternativas para dicho refuerzo; la soldadura de perfiles o chapas metálicas en todas y cada una de las viguetas del forjado, similares a las de las vigas, o la conversión en “for-



5. 5. Refuerzo de forjado de viguetas metálicas mediante suplemento de perfiles.



5. 6. Refuerzo de forjado de viguetas metálicas con losa conectada (forjado mixto).

jado mixto” en base a la conexión por la parte superior de una pequeña losa de hormigón armado que, además de aumentar inercia y capacidad resistente, también rigidiza el conjunto.

3.4.1. Refuerzo metálico

El planteamiento es el mismo que hemos hecho para el refuerzo de las vigas, por lo que también lo será la solución y a ella remitimos. En este caso, únicamente podremos añadir la conveniencia de rigidizar entre sí las distintas viguetas para asegurar su trabajo conjunto.

El refuerzo se realiza por la parte inferior, bien en toda la longitud del vano, bien en los $3/5$ de la luz, según las necesidades dadas por el cálculo previo.

En el caso en que las viguetas tengan problemas de apoyo por hacerlo directamente sobre obra de fábrica (caso harto frecuente) convendrá actuar también sobre dicho apoyo. Para ello, lo más cómodo será unificarlo a base de introducir otro perfil metálico transversal adosado al muro, que asegure el apoyo de las viguetas. Si esta solución no se puede llevar a efecto por motivos de decoración, habrá que recurrir a la consolidación individual del apoyo de cada una de las viguetas con inyección de morteros expansivos, previo el nivelado de aquéllas.

3.4.2. Forjado mixto

Cuando no se puede actuar por la parte inferior del forjado y cuando cabe la posibilidad de aumentar el canto del mismo por la parte superior, bien porque tengamos holgura suficiente al eliminar viejos pavimentos, bien porque no importe subir la cota, entonces la solución más adecuada para el refuerzo y, sobre todo, la eliminación de vibraciones, es la colocación y conexión de una losa de hormigón. Se trata de losas armadas de espesores reducidos (entre 10 y 15 cm. de canto) que se une a las viguetas mediante conectores metálicos.

Usaremos un hormigón de 200 Kp/cm^2 de resistencia característica y una armadura de cuantía mínima al estar las viguetas muy juntas (80 cm) excepto para apoyos continuos donde aparecen esfuerzos especiales de tracción.

Para el cálculo, amén de recurrir a los tratados especializados, utilizaremos como fórmula básica la que nos da el momento de inercia de la sección mixta, que según F. Quintero será:

$$I = B \cdot Hc^3/12 + Ac (Xg - Hc/z)^2 + Is + Ag \cdot (Hs/z + Hc - Xg)^2$$

Donde: B = es la separación entre viguetas

Hc = espesor de la losa

Ac = sección del hormigón

Xg = posición del centro de gravedad respecto a la fibra superior del hormigón

Is = momento de inercia de la vigueta

As = sección del perfil metálico

Hs = canto de dicho perfil

Además de este valor deberemos analizar los esfuerzos de flexión y cortadura que nos permitirá conocer el estado último del nuevo forjado mixto. En cualquier caso, el proceso constructivo deberá seguir, por lo menos, los siguientes pasos:

- Apoyo del forjado a reforzar para evitar movimientos o flechas temporales.
- Eliminación del solado existente con saneado de la cara superior del forjado y limpieza e imprimación de las alas superiores de los perfiles metálicos. Por el contrario, las bovedillas deben quedar enteras y enrasadas con los perfiles para que nos sirvan de encofrado perdido de la nueva losa. No obstante, en caso de estar resueltas las bovedillas con yeso, deberemos protegerlas con film de polietileno para evitar el contacto del viejo yeso con el nuevo hormigón o, por el contrario, utilizar cementos resistentes al yeso.
- Replanteo y soldadura de los conectores al ala superior de las viguetas

y atado a la malla de la losa. Estos pueden ser, bien trozos de redondo en forma de Z, bien cartabones de perfil UPN ó PNL 80-8, bien pernios tipo Nelson soldados a pistola.

- Hormigonado de la losa cuidando no deformar la malla de refuerzo, para lo que dispondrá de los necesarios separadores.

3.5. UNIONES

Hasta ahora hemos hablado de refuerzo de los elementos componentes de las estructuras, sean pilares, vigas o forjados, pero en su momento hemos mencionado la importancia que tienen las uniones en las estructuras metálicas. Por ello resulta conveniente indicar algo sobre las técnicas de intervención en estos casos, que resultan cruciales en las estructuras trianguladas planas y espaciales. Para ello consideramos tres tipos de uniones básicas; roblonado/atornillado, soldadura, articulación con pasadores.

3.5.1. Roblonado / atornillado

El deterioro de estos tipos de uniones vendrá dado, bien por las chapas unidas, bien por los roblones o tornillos. En cualquiera de los casos, la primera operación será un saneado a fondo y, en todo caso, la aplicación de radiografías o ultrasonidos para detectar las roturas.

Si la rotura afecta a los roblones o tornillos, habrá que sustituirlos por pernios de alta resistencia que permitan aplicar un apriete suficiente. Si la rotura afecta a alguna de las chapas, habrá que suplementar ésta con una nueva, bien soldada a la antigua, bien atornillada, para lo que habrá que calcular su dimensión de manera que con el tipo de unión elegido sea capaz de transmitir los esfuerzos de la unión.

En cualquier caso, antes de proceder a la reparación hay que comprobar la capacidad mecánica de la propia unión por si resulta necesario aumentarla, lo que podremos hacer, bien sustituyendo roblones o pernios por otros de mayor resistencia, bien suplementando las chapas hasta conseguir la resistencia necesaria.

3.5.2. Soldadura

El problema principal de la unión soldada será la rotura del cordón por algún defecto de ejecución o por exceso de tensión, aunque en este último caso también puede romper el perfil en las proximidades de la unión.

En cualquier caso, una vez saneado y conocidas las causas, la reparación consistirá en volver a ejecutar la unión, lo que puede llevarse a cabo de dos maneras.

- Picado de la soldadura antigua y nueva ejecución de la misma, si el problema era de error de ejecución, siempre que se cumplan las condiciones de soldabilidad y dimensiones.
- Aplicación de nuevas piezas en forma de casquillos (normalmente angulares) que permitan realizar una nueva unión entre los dos perfiles a través del nuevo elemento. En caso de que se necesite aumento de sección en la unión por mor de las tensiones que se tienen que absorber, se procederá a un refuerzo previo con chapones o palastros soldados en borde y en centro, antes de ejecutar la soldadura de la unión propiamente dicha.

Una vez realizada la reparación, hay que comprobar la buena ejecución de las soldaduras e imprimir toda la zona contra la oxidación.

3.5.3. Articulaciones

Se trata de uniones móviles a base de cartelas en las dos piezas a unir y pasadores que las atan. El fallo suele estar en el pasador, por corrosión o sección insuficiente. De ser así, la reparación consistirá en rehacer la unión retirando el pasador lesionado y colocando uno nuevo que cumpla las exigencias mecánicas. Lo mismo necesitaremos si el problema se ha dado en las cartelas, cambiando o reforzando las que hayan fallado.

3.6. LESIÓN DEL MATERIAL

Las técnicas de reparación vistas afectan sobre todo a fallos mecánicos de las piezas o uniones de la estructura, pero también se han indicado lesiones, tanto mecánicas como químicas, que afectan al material metálico como tal, más que a la pieza estructural. Conviene hacer mención también a la reparación de esas lesiones que, como se ha indicado en el apartado 2.1 son, sobre todo, rotura frágil o por fatiga, desgarro laminar y corrosión. Cabe pues distinguir entre dos grandes tipos; las mecánicas, que provocan rotura, y las químicas, que alteran el material superficialmente.

3.6.1. Lesiones mecánicas

Con carácter general, cuando se descubre una lesión de este tipo hay que proceder a una inspección exhaustiva de todos los elementos de la misma remesa para detectar todos los fallos posibles.

Una vez hecho esto, se nos presentan dos alternativas, bien la sustitución de los elementos afectados por otros nuevos de las mismas características, bien el refuer-

zo parcial de la zona lesionada. Para la primera, se procederá a los apeos necesarios antes de su eliminación y sustitución, asegurando su puesta en carga en base a las uniones. Para la segunda, nos podremos ayudar de chapones soldados a las partes planas del perfil o atornilladas al mismo, todo ello según las facilidades operativas que se nos presentan.

Este refuerzo puede afectar a una parte de la pieza donde se localiza la lesión o, por el contrario, puede referirse a toda ella, con lo que podremos llegar a una sustitución funcional del elemento sin necesidad de eliminar el antiguo (simplemente lo anulamos) lo que puede facilitar la labor operativa.

3.6.2. Lesiones químicas

También con carácter general, cuando se interviene en una estructura metálica por cualquier motivo, conviene llevar a cabo una revisión general de su estado de oxidación y posible corrosión y, en este último caso, comprobar las secciones útiles de las piezas para conocer su funcionamiento mecánico. A continuación se procederá a una imprimación general contra la oxidación y, en caso de zonas donde la corrosión esté más avanzada (normalmente zonas húmedas) procederemos con los siguientes pasos:

- Saneado exhaustivo hasta eliminar todo resto de metal corroído.
- Si la sección resultante es insuficiente por capacidad mecánica, procederemos a los refuerzos necesarios según ha quedado indicado en 3.2, 3.3 y 3.4.
- Si la sección útil es todavía suficiente, imprimación anticorrosiva generalizada.
- Si la causa de la corrosión es un foco concreto de humedad, procederemos a eliminarlo. Si se trata de humedad de condensación, procederemos a aislar el elemento metálico con material que sea además impermeable para que no lo alcance el vapor de agua.

4. MEDIDAS DE PREVENCIÓN

A la vista de los procesos patológicos estudiados, de sus lesiones y de sus causas, podemos establecer una serie de medidas de prevención a tener en cuenta durante el proceso de construcción (proyecto, fabricación, ejecución y mantenimiento) con el objeto de evitar la presencia de causas indirectas que puedan facilitar la aparición de dichos procesos patológicos.

Estas medidas podemos agruparlas en dos clases en función del proceso patológico a evitar, sea del propio material, sea del elemento constructivo.

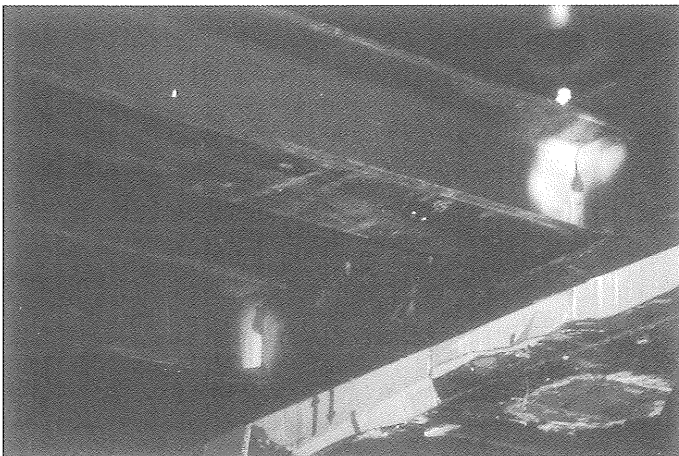
4.1. DEL MATERIAL

Son las que buscan la durabilidad del material metálico y podemos distinguir, a su vez, dos clases según el tipo de lesión, sea mecánica o química.

4.1.1. Prevención de lesiones mecánicas

Se basan en el cálculo y el control de calidad. En el **cálculo**, para asegurar que en ningún punto puedan aparecer tensiones superiores a las admisibles por el material especificado según NBE-EA, teniendo en cuenta las posibles tensiones locales por pandeos y alabeos de alas y almas y, sobre todo, las provocadas por elementos de unión (pernios, soldaduras, articulaciones, etc.).

En el **control de calidad**, para confirmar que cada remesa de materiales va acompañada de su certificado de características técnicas, como si de un “documento de identidad” se tratara. Incluso con dicho certificado, y a pesar de que los productos metálicos para estructuras son de los que tienen un mayor nivel de control en su producción, no estará de más llevar a cabo el correspondiente control de recepción según lo indicado en la normativa correspondiente (NBE/EA) sobre todo para aquellas piezas que van a estar más solicitadas o en situaciones más delicadas, principalmente uniones. Del mismo modo con más hincapié, habrá que controlar las operaciones realizadas “in situ”, sobre todo las soldaduras según NBE/EA, y todo tipo de cortes y manipulaciones durante la ejecución (apriete de tornillos, cambios de geometría, etc.).



5. 4. Control de soldaduras por líquidos penetrantes.

4.1.2. Prevención de lesiones químicas

Nos referimos, principalmente, a los problemas de oxidación y corrosión. La solución universal está, como sabemos, en la aplicación de protecciones antioxidantes vistas en numerosos manuales y de las que la industria ofrece continuamente novedades. Pero no sólo la protección, sino además el diseño constructivo, son importantes. En efecto, el alejar el peligro de humectación superficial o aparición de pares galvánicos también resulta importante. Así, podemos mencionar, por lo menos, las siguientes precauciones.

- Evitar todo contacto con mortero de yeso, bien sea de acabados superficiales, bien sea de sujeción de elementos de cerrajería o acabados. Para ello deberemos asegurar que el elemento metálico está previamente protegido con mortero de cemento (armado con alguna malla para darle consistencia) o bien independizado con algún material separador (film de polietileno, mantas de espuma de PVC, etc.).
- Aislar e independizar las tuberías de agua, sean ascendentes o bajantes.
- Proteger con aislamiento térmico de poro cerrado las piezas situadas en cerramientos de fachada o cubierta con riesgo de condensaciones intersticiales.
- Evitar contacto con piezas de metales más electropositivos para impedir la aparición de pares galvánicos puntuales.
- Realizar las uniones soldadas que eviten a galvánico (ver fig. 5.3).

Amén de todas estas medidas, y sobre todo en estructuras metálicas vistas, deberemos asegurar un mantenimiento continuo que permita renovar la protección antioxidante.

Por último, y también como medida general y obligatoria por norma, debemos asegurar la protección contra el fuego según las intensidades marcadas en NBE-CPI, simultáneas a las protecciones anteriores.

4.2. DEL ELEMENTO CONSTRUCTIVO

Estas medidas deben tratar de evitar la aparición de deformaciones excesivas en los elementos en su estado último de servicio que provoquen roturas en los elementos de cerramiento y acabado o vibraciones molestas. Asimismo, deberemos asegurar el correcto funcionamiento de las uniones, sobre todo aquellas que necesitan movilidad como las articulaciones o los apoyos en dilatación.

4.2.1. Prevención de deformaciones

Podemos tomar dos tipos de medidas, reducir al máximo las deformaciones por cálculo, o independizar estructura y cerramiento.

En el caso de flechas de vigas y forjados, no hay duda de que hay que reducirlas a base de aumentar la inercia del elemento a flexión. En este sentido es importante insistir en el hecho de que los límites de flecha dados por las normas de cálculo de estructuras (NBE/EA) están pensados para que estas deformaciones no introduzcan esfuerzos excesivos para la capacidad de la propia estructura, pero no en función de los elementos de cerramiento que va a soportar o del posible cimbreo. Por ello, en nuestro proyecto deberemos atender a estos otros problemas estableciendo los límites de flecha indicados en 3.3.1, a saber:

- Para vigas y forjados que soportan tabiquería interior de fábrica o cerramientos de fachada del mismo material, la flecha no debe superar nunca los 10 mm. en valor absoluto, o los 8 mm. cuando estas flechas pueden acumularse.
- Para vigas y forjados de locales abiertos, límites de flecha de 13 mm. para evitar vibraciones excesivas.

En los casos de pandeo de pilares, podremos adoptar simultáneamente los dos tipos de medida indicados (reducir e independizar). La reducción debe estar alrededor de los 5 mm. de desplazamiento por pandeo tomados en valor absoluto, cuando este movimiento puede afectar a elementos de fábrica en contacto. Simultáneamente debemos independizar estructura de cerramiento por el procedimiento de forrar el pilar con elementos “blandos”, normalmente planchas de material aislante, que al mismo tiempo dificultan la aparición de condensaciones de vapor de agua sobre la superficie del elemento.

4.2.2. Prevención de rotura de uniones

Se basará, por un lado, en un correcto diseño constructivo y, por otro, en un estricto control de su ejecución.

En el diseño, deberemos comprobar su correcto funcionamiento (empotramiento, articulación o apoyo) y, sobre todo, la sección resistente de los elementos de aportación. Así, en las soldaduras, definición correcta de espesor y forma del cordón en todos los puntos; en articulaciones, sección suficiente de pernos y pasadores, analizando correctamente el camino crítico de los esfuerzos para asegurar la ausencia de puntos débiles, sea por esfuerzo cortante, sea por tracción; en los apoyos, en fin, tener la seguridad de su libertad de movimiento según la dirección de máximas dilataciones y contracciones, con la incorporación de elementos que faci-

liten ese movimiento, bien materiales sintéticos para pequeños desplazamientos, bien rodillos para dilataciones mayores.

En la ejecución, tendremos que extremar el control de calidad, tanto para comprobar la adecuación de los materiales y elementos a utilizar como su correcta colocación, con los ensayos de laboratorio o “in situ” que sean necesarios.

Por último, y sobre todo en las uniones, deberemos asegurar un correcto mantenimiento que comprenderá inspección periódica de un determinado porcentaje, así como reposición o protección de los elementos componentes.

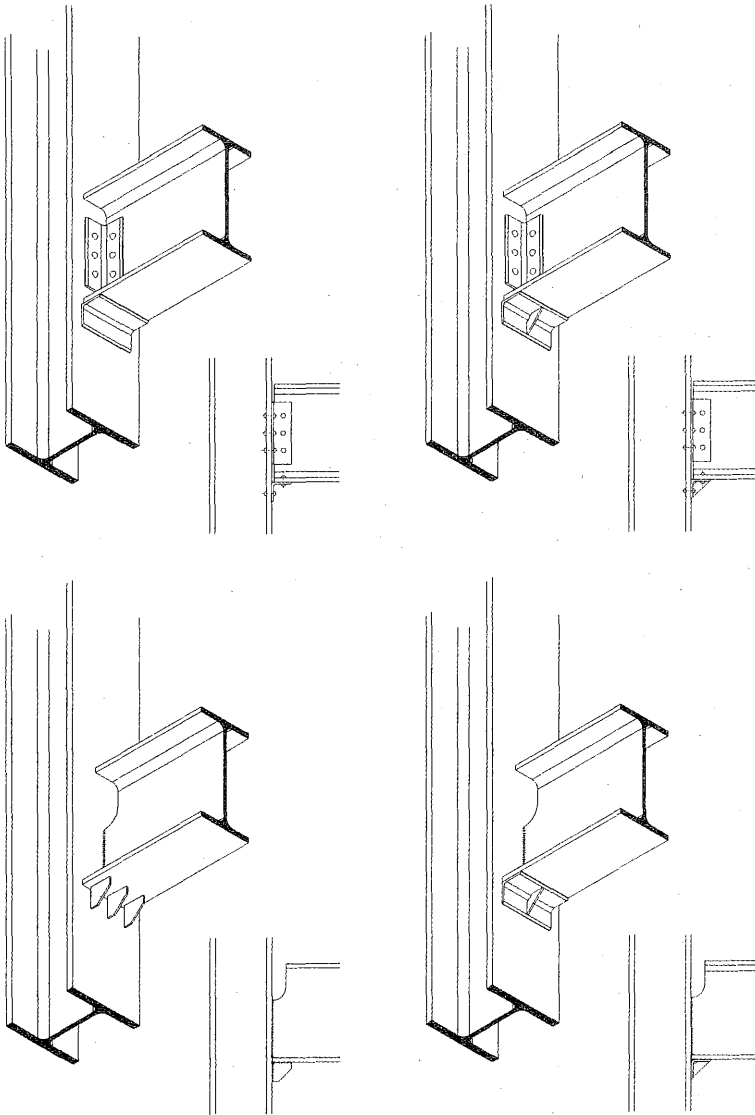


Fig. 5. 15. Soluciones de apoyo de viga en pilar.

Capítulo 6

SISTEMAS ESTRUCTURALES DE HORMIGÓN ARMADO

1. GENERALIDADES

Aunque ya los romanos conocían y hacían uso de un primitivo hormigón o conglomerado pétreo empleando en su fabricación cementos naturales (“opus caementicium”), el hormigón, tal y como lo conocemos hoy día, es un material surgido a partir del cemento artificial, obtenido por primera vez por Aspdin en 1824. La desconfianza con que fue acogido en principio por los constructores, debido a la ausencia de explicación sobre los fenómenos de fraguado y endurecimiento y a la falta de aceptación de un producto creado en laboratorio, no impidió la investigación y el desarrollo continuo de la nueva ciencia de la Hormigonería. Durante la segunda mitad del siglo XIX y el primer tercio del XX se producen los principales aportes a la tecnología del hormigón. El cemento iría mejorando continuamente sus calidades y variedades, sin mencionar las útiles modificaciones de sus características obtenidas a partir del uso de aditivos.

En 1849 Monier construye el primer hormigón armado introduciendo telas metálicas en la fabricación de macetas y tiestos de jardín. Se puede decir que surge así un nuevo material con cualidades y tecnología propia. Durante la segunda mitad del siglo comienza la investigación de elementos constructivos en hormigón armado y aparecen los pioneros de este material: Monier, Ransone, Coignet, Hennebique, Perret, Garnier, etc. En 1927 Freyssinet crea el hormigón pretensado, una nueva técnica y, casi se podría decir, un nuevo material, ya que tiene características y tecnología propias diferentes del hormigón armado.

La conjunción del hormigón y del acero en un nuevo material es lo que confiere al hormigón armado sus ventajas respecto de otros materiales:

El hormigón aporta su **carácter formáceo**, capacidad de adaptarse a la forma que se desee mediante el encofrado que se emplee. Su **monolitismo** y su **hiperestatismo**, eliminando algunos problemas de enlace y confiriendo a la estructura una gran seguridad frente a sismos y cargas dinámicas. Por otro lado, el acero aporta al hormigón armado la posibilidad de hacer frente a **esfuerzos de tracción**, al tiempo que es protegido de los agentes exteriores y de la oxidación y corrosión por el recubrimiento y el carácter alcalino del hormigón. Se trata pues de una excelente cohabitación entre dos materiales de características propias radicalmente diferentes y, sólo aparentemente, incompatibles.

2. CAUSAS DE LOS PROCESOS PATOLÓGICOS

2.1. DEFECTOS DE DISEÑO Y CÁLCULO

Un considerable porcentaje de procesos patológicos en estructuras de hormigón armado tiene como causa originaria errores cometidos en la fase de proyecto. Normalmente, no son estos errores únicamente los que propician el inicio del proceso pero facilitan la concurrencia de otras causas que son determinantes. No cabe atribuir siempre estos errores de proyecto a la ignorancia, ya que la mayor parte de las veces se deben a las prisas, a la falta de detenimiento en el estudio de la estructura y de las circunstancias que inciden en su comportamiento.

La gran mayoría de los errores en la fase de proyecto pueden ser agruparlos en seis tipos diferentes:

2.1.1. Errores de concepto del funcionamiento de la estructura

Pueden dar lugar a incumplimientos de los principios de la mecánica, a la consideración de vínculos o de grados de libertad de la estructura o de alguna de sus partes que luego no se dan en la realidad, a una modelización de la estructura o de los nudos poco ajustada al comportamiento real de los elementos o de los materiales constructivos, a la ausencia de comprobaciones de equilibrio o estabilidad del conjunto, etc.

2.1.2. Errores en la evaluación de las acciones

Pueden dar lugar a la infravaloración de algunas de las acciones que pueden afectar a la estructura o a la no consideración de otras como acumulación de agua en azoteas, terrazas o salientes cuando los mecanismos de desagüe son insuficientes, almacenamiento de algunos materiales según el uso del edificio, etc.

2.1.3. Errores en el establecimiento de hipótesis de carga

Como puede ser el olvido de determinados esfuerzos que pueden producir algunos elementos de la estructura sobre otros, o la no consideración en los cálculos de determinadas hipótesis de carga que se dan en la realidad, sobre todo en la fase de construcción, cuando la estructura no está completada y no existen algunos vínculos o elementos considerados en el cálculo y que pueden ser imprescindibles para la estabilidad de parte o de todo el conjunto.

2.1.4. Errores en el cálculo de los esfuerzos

Incluso cuando se hace uso de ordenadores para llevar a cabo estos cálculos. Se ha difundido la idea de que el ordenador es la panacea en el cálculo de estructuras, sobre todo para quienes no poseen conocimientos suficientes como para llevarlos a cabo. Hay que decir al respecto que los ordenadores están fabricados por la mano del hombre y, por tanto, no son perfectos por lo que, aunque es muy poco probable, pueden también cometer errores que, si no son corregidos por una persona que tenga idea del orden de magnitud de los resultados, se plasmarán en el proyecto. Pero lo más usual en estos casos es la ignorancia en cuanto al funcionamiento del programa de cálculo utilizado, que puede no ser el más apropiado, o puede dar lugar a una mala modelización de la estructura o a una mala interpretación de los resultados obtenidos.

2.1.5. Errores en la dimensión de las secciones o en la disposición de las armaduras

Sobre todo esto último puede ser provocado por el desconocimiento de la manera en que trabajan los elementos estructurales y de la manera en que se transmiten los esfuerzos. Es un error relativamente común la no consideración de longitudes de anclajes suficientes, sin las cuales las armaduras no pueden trabajar al máximo de sus posibilidades, aunque su cuantía sea suficiente en una determinada sección del elemento estructural.

2.1.6. Errores en la elaboración de detalles

Bien por la escasez de definición en la documentación, que puede dar lugar a que los operarios sobreentiendan o determinen por su cuenta algunos datos, bien por la poca claridad de la misma documentación, que puede dar lugar a confusión o equívoco en la ejecución, o bien por el diseño de un detalle que, por cualquier circunstancia, sea irrealizable y de lugar a improvisación en obra.

2.2. DEFECTOS EN LOS COMPONENTES DEL HORMIGÓN ARMADO

2.2.1. El cemento

El cemento es un material que se obtiene al moler el clinker y se le pueden añadir una serie de productos que le confieren determinadas propiedades físicas adaptándolo a diversas necesidades. En el hormigón es el componente hidráulicamente activo que conglomerará al resto.

Los cementos pórtland son los que normalmente se usan en la construcción. Al mezclar cemento pórtland con agua comienza el proceso de fraguado y endureci-

miento que se inicia con la formación de un gel al disolverse en el agua las partículas de cemento. Con el paso de las horas estas partículas se van hidratando progresivamente produciendo unos cristales alargados que, según crecen y se entrecruzan mientras se evapora el agua que sobra para la hidratación, van aumentando la dureza y resistencia de la mezcla. En la reacción química se producen fundamentalmente cristales de silicato cálcico hidratado y de hidróxido cálcico.

Para lograr el máximo rendimiento en el endurecimiento del cemento se requiere una adecuada proporción entre las cantidades de agua y de cemento empleadas en la mezcla. Si el porcentaje de agua utilizada es escaso, no habrá suficiente cantidad como para hidratar todas las partículas de cemento, por lo que no se completará su cristalización redundando en una menor resistencia del hormigón. Este riesgo se acentúa en lugares con clima seco o caluroso. Por el contrario, si el contenido de agua en la mezcla es demasiado alto, dará lugar a una excesiva porosidad capilar del hormigón, mayor en la superficie que en el interior de la masa fraguada. En un hormigón, el porcentaje de agua apropiado es mayor cuanto más porosos y finos sean los áridos.

También es importante lograr una dosificación adecuada del cemento ya que las cualidades de un hormigón dependen directamente de ella. Un aumento de la dosificación implica mayor resistencia mecánica y mayor adherencia hasta cierto límite, mayor protección de las armaduras contra la oxidación, pero también mayor retracción hidráulica.

2.2.2. Los áridos

Los áridos son el material conglomerado por el cemento y constituyen la mayor parte del hormigón. Se obtienen, bien por explotación de las graveras naturales (canto rodado) bien por molidura de la roca (árido de machaqueo). Por su tamaño se clasifican en áridos gruesos y finos.

Los áridos repercuten fundamentalmente en la durabilidad y resistencia del hormigón y pueden ser causa de procesos patológicos por su granulometría o por la presencia en ellos de sustancias nocivas.

La granulometría es la proporción en que se distribuyen los tamaños de los granos que forman el árido. Una adecuada granulometría busca una distribución de manera que minimice el volumen de huecos existente en la mezcla. El resultado de una incorrecta granulometría es una baja compacidad del hormigón, dando lugar a un aumento de su porosidad y a una reducción de su capacidad resistente. Por otro lado, un exceso en la cantidad de finos del árido tampoco es positivo ya que requiere una mayor dosificación de cemento para poder conglomerar una mayor superficie específica del árido y reduce la adherencia entre el árido grueso y la

pasta de cemento al interponerse una cantidad excesiva de partículas de finos. Así mismo hay que considerar un tamaño máximo del árido empleado, que no debe ser mayor que la separación entre armaduras o que la distancia entre la armadura y el encofrado, para que el hormigón pueda llenar bien todos los huecos.

Es muy conveniente lavar los áridos susceptibles de contener algunas sustancias perjudiciales que a veces lo acompañan, como restos orgánicos, arcilla, compuestos de azufre, cloruros, piritas, etc. Además hay que evitar el empleo de áridos con componentes que pueden reaccionar con los álcalis del cemento, y áridos activos como las piritas, que tienen propiedades expansivas.

2.2.3. El agua

El agua es necesaria en la fabricación del hormigón para hidratar los componentes del cemento y para hacer trabajable la masa del hormigón con vistas a su puesta en obra. El agua puede ser causa de procesos patológicos también por dos razones: por el empleo de una cantidad excesiva en el amasado o por su baja calidad, es decir, por el contenido que tiene de sustancias perjudiciales.

Como ya se ha dicho, una elevada relación agua-cemento produce, además de una mayor retracción en el proceso de fraguado, una mayor porosidad en el hormigón, lo que redundaría en una disminución de su resistencia y en un incremento de su permeabilidad.

En cuanto a la calidad del agua empleada en el amasado, la instrucción española establece una serie de características rechazables, como un pH menor de 5, ó un contenido excesivo de sustancias orgánicas, sulfatos, cloruros, etc. En este sentido, es problemático el empleo de agua de mar, especialmente por su contenido de cloruros que, como se verá más adelante, desprotegen a las armaduras de la oxidación.

2.2.4. Los aditivos

Son productos que se añaden al hormigón en su elaboración para mejorar alguna o algunas de sus características de forma estable a lo largo del tiempo. Los aditivos pueden ser origen de procesos patológicos cuando no se emplean adecuadamente o cuando se emplean dosis excesivas o insuficientes.

Existen muchos tipos de aditivos en el mercado. Cada aditivo tiene su función y, en general, suelen tener contraindicaciones o efectos secundarios no deseables, por lo que hay que estudiar detenidamente cada caso, comprobando que el aditivo que se va a emplear es realmente el adecuado y que se obtiene más beneficio que perjuicio. Por otro lado, hay que remitirse siempre a las instrucciones del fabricante a la hora de establecer la cantidad necesaria ya que una dosis incorrecta, tanto por

exceso como por defecto, o una mezcla de dos o más aditivos diferentes, puede conducir a resultados insuficientes e incluso contrarios a los que se esperaba obtener.

2.2.5. El acero

El acero se utiliza en forma de barras embebidas en el hormigón. Dada la baja resistencia a esfuerzos de tracción que tiene el hormigón y su rotura frágil y sin avisar, no se cuenta con ella a la hora de diseñar y dimensionar los elementos de hormigón por lo que se considera que son las barras de acero el material resistente frente a las tracciones. La consecuencia es que los defectos existentes en el acero de las armaduras, en su colocación, o la falta de adherencia entre las barras y el hormigón, pueden provocar procesos patológicos en elementos estructurales de hormigón armado, cuyos efectos se agravan si tienen que hacer frente a esfuerzos de tracción o flexión, como es el caso de forjados, vigas, muros de contención, algunos soportes, etc. Actualmente son de uso generalizado las barras corrugadas dada su adherencia al hormigón, mucho mayor que la de las barras lisas no obstante podemos encontrarnos en nuestros trabajos de intervención con estructuras de hormigón realizada con este tipo de barras.

Los defectos debidos al mismo material, como pueden ser la presencia de impurezas o los defectos en la superficie de las barras, que pueden provocar disminuciones en su resistencia nominal, se producen raramente dada la garantía de calidad que la instrucción impone al fabricante de aceros para hormigones armados.

Mucho más usuales son los defectos provocados por la deficiente manipulación y puesta en obra de las armaduras. La falta de cuidado en el almacenamiento del material en la obra puede dar lugar a una corrosión prematura de las barras, y la falta de limpieza de las barras en el momento de la puesta en obra puede provocar una falta de adherencia entre el hormigón y el acero por la interposición de sustancias tales como grasas, aceites, pinturas, etc. Asimismo afecta a la necesaria adherencia la no existencia o la escasez de longitudes de anclaje apropiadas y la sobreabundante densidad de barras, que impide que el hormigón las recubra adecuadamente.

Puede ser peligroso el uso de aceros de diferentes características resistentes en los mismos elementos estructurales ya que puede producir confusión o error en la utilización de cada uno de ellos.

Por último, es fundamental asegurar unos recubrimientos mínimos y la inmovilidad de las armaduras en el momento de hormigonar, ya que si se descolocan o deforman en este proceso no es posible corregir el error, salvo demoliendo el elemento y volviendo a construirlo

2.3. DEFECTOS DE FABRICACIÓN

La fabricación defectuosa del hormigón es el origen de numerosos procesos patológicos y suele dar lugar a disminuciones de la resistencia y a defectos de acabado en el hormigón.

Algunos de los aspectos relativos a la fabricación, como la dosificación del cemento, la relación agua-cemento o el empleo incorrecto de aditivos, han sido ya tratados en los puntos referentes a defectos en los componentes del hormigón. Otros aspectos son la mezcla, el amasado y el tiempo de utilización.

La mezcla de los componentes, sobre todo si se utilizan aditivos añadidos en seco con el cemento, debe ser enérgica para que la homogeneidad sea correcta. Lo mismo cabe decir del amasado para no provocar problemas debidos a falta de uniformidad en la masa, aunque esto no sólo depende del amasado sino también de la puesta en obra.

Además, el proceso de fraguado implica un tiempo de utilización de la masa de hormigón fresco que nunca se debe sobrepasar. Si la puesta en obra se produce cuando el cemento ya ha empezado a endurecer, se provocará una gran heterogeneidad del hormigón con grave disminución de su resistencia.

2.4. DEFECTOS DE PUESTA EN OBRA

Tan importante como una correcta fabricación del hormigón es un correcto transporte, vertido, compactación y curado del hormigón ya que todas estas etapas de la puesta en obra pueden provocar defectos graves en un hormigón que estaba bien fabricado.

Previamente al vertido del hormigón en el molde, se debe comprobar que los elementos de los encofrados estén bien colocados, sujetos y rigidizados ya que no es posible corregir las deformaciones que sufran al verter el hormigón, y si estas son excesivas será inevitable demoler el elemento para volver a construirlo. Asimismo, se debe limpiar de impurezas las caras interiores de los encofrados para evitar aspectos visuales indeseables, comprobar que no se puedan producir pérdidas de lechada entre las juntas del encofrado, lo que redundará también en un mal aspecto visual y en una falta de conglomerado del árido en la superficie, y, cuando se emplean encofrados de madera, humedecerlos para que ésta no absorba durante el proceso de fraguado el agua que necesita el cemento para hidratarse.

En el vertido del hormigón hay que evitar la disgregación, es decir, la separación de los componentes: el árido grueso, el árido fino y la pasta de cemento. Este fenó-

meno se intensifica cuando se vierte el hormigón desde altura y al caer choca contra las armaduras y las paredes del encofrado. Por ello, es necesario a veces hacer uso de conductos flexibles u otros mecanismos que eviten siempre una caída libre del hormigón desde una altura mayor de dos metros.

Tras el vertido del hormigón se procede a su compactación, generalmente mediante vibrado, para rellenar todos los huecos y evitar que queden coqueras, que disminuyen la resistencia del elemento estructural y aumentan el peligro de oxidación de las armaduras. No debe verterse en obra más hormigón del que pueda compactarse de forma eficaz, por ello la altura de cada tongada debe permitir vibrarla con el método que se utilice antes de verter la siguiente. También es preciso evitar armar los elementos estructurales tan densamente o con separaciones tan pequeñas entre redondos, que no se pueda introducir el vibrador entre las armaduras quedando el hormigón que hay debajo sin vibrar. Esto puede ocurrir en el armado de la cara superior de vigas o losas en sus empotramientos.

Durante el curado del hormigón, es decir, durante el proceso de endurecimiento, la temperatura y la humedad del ambiente deben ser tales, que no se produzca una evaporación prematura del agua del hormigón, lo cual se traduciría en una precaria hidratación del cemento y, por tanto, una menor capacidad resistente del hormigón. Esto es difícil de conseguir en épocas secas y calurosas, sobre todo en países como el nuestro, donde es preciso regar con frecuencia el hormigón en proceso de curado e incluso cubrirlo en lugares excesivamente soleados.

Finalmente, se realiza el desencofrado y la retirada de medios auxiliares como puntales o cimbras, que sujetan los elementos estructurales en tanto en cuanto éstos todavía no poseen capacidad resistente suficiente. Para facilitar la retirada de los encofrados se suele impregnar su superficie interior con productos antiadherentes antes de hormigonar. El descimbrado es un proceso especialmente delicado porque implica la puesta en carga de los elementos construidos, por lo que nunca se debe iniciar sin tener la seguridad de que el hormigón ha adquirido la resistencia suficiente como para soportar los esfuerzos que le van a llegar sin deformaciones excesivas que produzcan gran fisuración. Hay que señalar en este punto que en el cálculo de las estructuras no siempre se tiene en cuenta que la peor hipótesis de carga para algunos elementos, no siempre se produce cuando la estructura está concluida y con toda la carga estimada actuando. Puede ocurrir que, al descimbrar un elemento cuando todavía no se ha completado toda la estructura de la que forma parte, se le esté sometiendo a esfuerzos que no han sido considerados en el cálculo por no considerar hipótesis de carga que se producen de hecho durante el proceso de construcción.

2.5. CAMBIO DE LAS CONDICIONES DE USO

Hoy día es relativamente frecuente aprovechar edificios que se proyectaron y construyeron con un determinado fin para albergar actividades diferentes de aquellas para las que fueron inicialmente pensados. Estas actividades implican en, algunos casos, cargas o sobrecargas que introducen en la estructura del edificio nuevos o mayores esfuerzos de los que es capaz de soportar. Cuando el cambio en las condiciones de uso de un edificio se realiza sin considerar estos inconvenientes, se puede propiciar el inicio de procesos patológicos, sobre todo el agotamiento o deformación excesiva de toda o parte de la estructura. Si antes de llevar a cabo ese cambio de uso del edificio se evalúan las nuevas acciones que afectarán a la estructura existente y su capacidad para hacerlas frente, se puede evitar tener que recurrir a una reparación o incluso a una demolición total o parcial, que puede resultar más costoso que abordar un refuerzo previo de la estructura.

Otro tipo de cambio de las condiciones de funcionamiento de la estructura se da cuando se decide ampliar la superficie construida, sobre todo si se lleva a cabo aumentando el número de plantas del edificio, o cuando se decide, por cualquier motivo, realizar reformas puntuales en la estructura existente. En ambos casos es imprescindible un cuidadoso estudio del estado de la estructura y de su capacidad para soportar las nuevas acciones sin colapsar o sin sufrir deformaciones excesivas. Especialmente cuando se proyectan reformas puntuales de una estructura, es preciso considerar posibles alteraciones del comportamiento estructural o de los grados de libertad de algunos elementos, sobre todo de los elementos isostáticos como los voladizos. Por todo esto a la hora de abordar el estudio de los daños de una estructura es fundamental conocer la existencia de anteriores intervenciones, que pueden ser la causa originaria del proceso patológico.

2.6. DURABILIDAD DE LOS MATERIALES

Por muy duraderos que parezcan, los materiales de construcción también padecen las consecuencias del paso del tiempo: el hormigón sufre fenómenos de carbonatación y fluencia, el acero de las armaduras se oxida, etc.

De la carbonatación del hormigón y de la oxidación de las armaduras se hablará en el apartado de daños causados por agentes químicos, ya que el paso del tiempo no es la causa directa del proceso patológico aunque, sin duda, contribuye a ello. El fenómeno de **fluencia** del hormigón sí depende directamente del factor tiempo. Consiste en la deformación que sufre el hormigón a largo plazo debido a la acción de cargas permanentes. Esta deformación se añade a la deformación instantánea

que se produce en la estructura al entrar en carga, y puede ser con el tiempo igual o mayor que aquella. Si bien no entraña riesgo en cuanto a la estabilidad y resistencia de la estructura, puede ser causa de fisuras y grietas en tabiques y muros más o menos rígidos, al acompañar solidariamente a los elementos estructurales, generalmente vigas, en dichas deformaciones, si no han sido tenidas en cuenta en el cálculo.

Aunque más adelante se explique, cabe recordar en este apartado el caso del **cemento aluminoso**, cuya resistencia disminuye de forma acusada con el paso de los años.

No es posible evitar el comienzo de estos procesos eternamente, pero sí se pueden tomar las medidas apropiadas en el diseño y dimensionado de la estructura que permitan evitar su aparición prematura.

3. TIPOS DE DAÑOS

3.1. DAÑOS POR CAUSAS MECÁNICAS

3.1.1. Abrasión

Es un daño producido por el rozamiento o impacto continuo o frecuente de elementos sobre la superficie del hormigón que, en un primer momento, lo pule, pero puede llegar a destruirlo. Este tipo de daño es frecuente en suelos industriales o suelos de hormigón que soporten tráfico. La capacidad del hormigón para soportar la abrasión depende fundamentalmente de su resistencia a compresión, en caso de impacto, y de la resistencia al desgaste del árido, en caso de rozamiento.

3.1.2. Erosión

La erosión es el daño que sufre el hormigón al desgastarse debido al impacto de partículas transportadas por el agua o por el aire en circulación. La erosión es tanto mayor cuanto más elevada sea la velocidad con la que se mueve el agua o el aire. Además, la mayor o menor gravedad de los efectos provocados depende también de la resistencia a compresión del hormigón, de la dureza y granulometría del árido empleado y del mejor o peor acabado de la superficie.

La erosión provocada por la circulación del agua puede provocar efectos graves en estructuras hidráulicas, pero la erosión eólica muy raramente da lugar a procesos patológicos en estructuras. En todo caso los daños por erosión en estructuras de hormigón armado en edificación suelen ser insignificantes ya que, en primer lugar, estas estructuras suelen estar protegidas por el cerramiento y, en segundo

lugar, es un proceso muy lento comparado con otros problemas de envejecimiento de los edificios.

3.1.3. Deformaciones y roturas

Cuando un elemento de hormigón armado se ve sometido a solicitaciones excesivas aparecen, en la gran mayoría de los casos, daños en forma de deformaciones, grietas o fisuras que avisan del estado tensional en el que se encuentra. Estas lesiones no tienen por qué anunciar un agotamiento inminente de la capacidad resistente del hormigón armado; pueden suponer deformaciones excesivas aunque con una reserva suficiente de resistencia.

Veamos las distintas solicitaciones y sus consecuencias.

3.1.3.1. Tracción

Es, directa o indirectamente, la causa última de la fisuración del hormigón ya que, aunque no es usual que elementos de hormigón armado trabajen a tracción pura, se producen tensiones de tracción en piezas debido a esfuerzos de flexión, de cortante e incluso de compresión.

La rotura o fisuración debida a esfuerzos de tracción es instantánea y se produce siempre según planos perpendiculares a la dirección de la tensión.

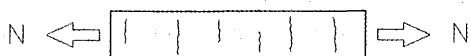


Fig. 6.1. Fisuración por esfuerzo de tracción.

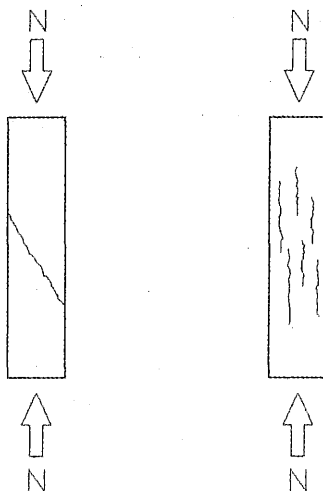


Fig. 6.2. Fisuración por esfuerzo de compresión.

3.1.3.2. Compresión

En un elemento de hormigón armado sometido a esfuerzos de compresión excesivos, cuando la pieza tiene canto suficiente y no pandea, se produce una fisuración según planos sensiblemente paralelos a las tensiones (longitudinales) aunque la dirección depende mucho de la forma de la pieza, de las restricciones a las que está sometida según las condiciones de contorno y de la mayor o menor homogeneidad del hormigón. Contrariamente a las fisuras producidas por esfuerzos de tracción, las producidas por esfuerzos de compresión empiezan a hacerse visibles con esfuerzos inferiores a los de rotura y van aumentando de tamaño de forma continua.

La aparición de fisuras de compresión en pilares constituye un síntoma de peligro inminente, ya que la rotura y hundimiento se puede producir de forma instantánea en cualquier momento. La situación es más acentuada en el caso de pilares muy esbeltos sometidos a posibles fenómenos de pandeo. En estos además de las piezas longitudinales, pueden aparecer otras transversales en la cara más fraccionada.

3.1.3.3. Esfuerzos cortantes

Se producen en piezas sometidas a flexión y generan en cada punto tensiones de compresión en una dirección y de tracción en la dirección perpendicular.

Las fisuras por cortante, o punzonamiento en el caso de losas de hormigón armado, son igualmente un síntoma peligroso, ya que se producen muy rápidamente y la rotura puede ser también inminente.

3.1.3.4. Flexión simple

Como es sabido, los esfuerzos de flexión producen deformaciones en forma de **flechas**, generan en las secciones de las piezas tensiones de compresión y de tracción que disminuyen según la proximidad del punto que consideremos a la fibra neutra. Las fisuras en estos casos se producen en las zonas traccionadas de la pieza en las que la deformación supera, a pesar del trabajo de las armaduras, lo que puede tolerar el hormigón. Este tipo de grietas o fisuras se caracteriza porque su anchura es máxima en la superficie de la pieza y decrece a medida que progresa hacia la línea neutra.

Contrariamente a las fisuras producidas por compresión, por tracción o por cortante, las producidas por flexión no son síntoma de peligro inminente ya que avisan con tiempo para poder tomar medidas y ni siquiera tienen porque indicar un estado de agotamiento de la pieza, pudiendo indicar simplemente un estado de deformación excesiva que desaparece en cuanto dejan de actuar las cargas que las han producido.

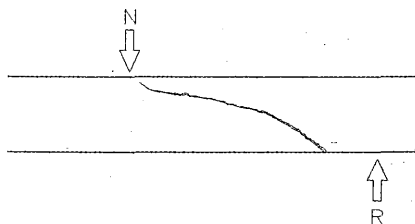


Fig. 6.3. Fisuración por esfuerzo cortante.

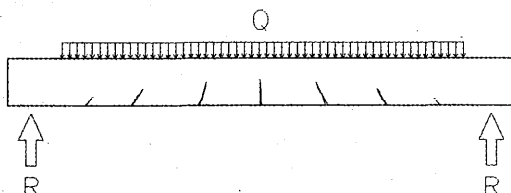


Fig. 6.4. Fisuración por flexión simple.

La importancia de las fisuras en este caso, estriba en que su dimensión prive a las armaduras de la protección necesaria contra la oxidación y corrosión.

3.1.3.5. Torsión

Las torsiones suelen producirse en edificación por incompatibilidad de deformaciones entre piezas unidas solidariamente. Las fisuras debidas a esfuerzos torsores se caracterizan por su trazado helicoidal a lo largo de todas las caras de la pieza, formando con su directriz un ángulo constante próximo a los 45° .

3.1.3.6. Retracción

Las tensiones que se producen en piezas de hormigón de gran superficie, sobre todo si no se han previsto las juntas necesarias, debido al fenómeno de retracción conjunta térmica e hidráulica, generan una fisuración abundante formando una red sensiblemente ortogonal. Esta fisuración se agrava por el afogado del hormigón cuando no se atiende el curado del mismo, sobre todo en los primeros días. Una vez endurecido el hormigón, pueden aparecer fisuras debidas a la variación dimensional superficial por cambios higrotérmicos, sobre todo en casas muy expuestas a esos cambios, debido a la retracción higrotérmica.

3.1.3.7. Dilatación térmica

Los cambios de temperatura a los que se puede ver sometida una estructura de hormigón armado dan lugar a aumentos y disminuciones de volúmenes y dimensiones de los elementos, acusándose más cuando una o dos de éstas dimensiones es mucho mayor que las otras (en piezas longitudinales y superficiales). No son propiamente estas variaciones de volumen las que producen la fisuración sino las sollicitaciones que aparecen en los elementos de la estructura al coartarse los movimientos que provocan esas variaciones de

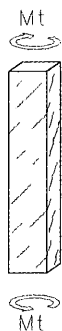


Fig. 6.5. Fisuración por torsión.

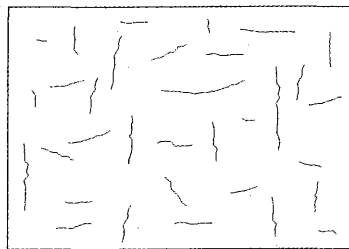


Fig. 6.6. Fisuración por retracción.

volumen. Por tanto la dilatación térmica puede dar lugar a esfuerzos excesivos de flexión y cortante y, más raramente, de compresión y torsión. Estas sollicitaciones indeseables pueden evitarse o reducirse disponiendo adecuadamente juntas de dilatación.

3.1.4. Daños por incendio

Los daños que produce un incendio en la estructura de un edificio dependen de muchos factores. Los principales son la resistencia de los elementos estructurales al fuego y la virulencia y duración del incendio, pero esto último depende a su vez de otros factores: cantidad y combustibilidad del material existente, distribución de este material, geometría y tamaño del local, condiciones de ventilación, etc.

La resistencia al fuego de los elementos constructivos se mide por la cantidad de tiempo durante el cual un elemento es capaz de conservar unas propiedades mínimas, que le permitan desempeñar la función para la que ha sido pensado. En este caso, la resistencia al fuego de los elementos de una estructura de hormigón depende del tiempo que, en un incendio, tarda determinado elemento en perder sus propiedades resistentes y colapsar bajo las acciones que soporta.

Tanto el acero como el hormigón ven reducida su resistencia cuando se alcanzan temperaturas elevadas (por encima de los 550°) pero el acero es más sensible que el hormigón, por lo que los recubrimientos se convierten en una protección fundamental de la estructura en caso de incendio. De todas formas, a elevadas temperaturas los coeficientes de dilatación del acero y del hormigón empiezan a variar sensiblemente produciéndose tensiones parásitas, disminución de la adherencia y desprendimiento de la capa protectora de los recubrimientos, efectos que se agravan en estructuras pretensadas debido, tanto a las características especiales de los aceros utilizados en pretensado como al estado tensional inicial de los elementos.

De todas formas, la manera en que un fuego afecta a una estructura de hormigón armado es un tema mucho más complicado que lo que aquí se ha dicho y profundizar en ello es algo que se escapa a la intención de este texto. Estos daños oscilan desde la aparición de manchas sin incidencia en su capacidad portante, hasta la pérdida total de resistencia de su estructura. Por ello, a la hora de evaluar los daños provocados por un incendio en una estructura de hormigón armado, es necesario proceder a una inspección cuidadosa realizando todas las pruebas y ensayos que sean necesarios.

3.1.5. Daños accidentales

La variedad de acciones accidentales o extraordinarias y de los daños que pueden provocar en la estructura de los edificios es enormemente amplia. Estos accidentes pueden tener su origen en causas naturales, como terremotos, huracanes, inundaciones, o en causas provocadas por acciones humanas, como impactos de vehículos o de elementos pesados, explosiones, terrorismo, etc. A su vez la probabilidad de que ocurran accidentes depende de muchos otros factores, como la situación geográfica o el clima, en caso de catástrofes naturales, o el tipo de edificio, ubicación, cercanía de vías de comunicación, existencia de conflictos armados, etc, en caso de catástrofes no naturales.

Uno de los tipos de acciones accidentales más estudiados en edificación es el de los **sismos o terremotos**, que están provocados por el deslizamiento y roce entre sí de planos de la corteza terrestre, originando vibraciones en el terreno. Estas vibraciones provocan movimientos horizontales de la cimentación de los edificios, generando aceleraciones que se traducen en fuerzas horizontales por la inercia que tienen las plantas superiores a permanecer en reposo. Estas fuerzas serán tanto mayores cuanto mayor sea la intensidad del terremoto y cuanto mayor sea la masa del edificio. Actualmente existen en la mayor parte de los países con zonas de riesgo sísmico, normativas que establecen medidas tendentes a evitar o, por lo menos controlar, los efectos de los terremotos en los edificios rigidizando la cimentación, flexibilizando la estructura en las plantas más altas, estudiando las zonas y los nudos más críticos, etc. En algunos edificios construidos en zonas de riesgo sísmico antes de la aparición de una normativa específica, puede ser necesario realizar una consolidación llevando a cabo las medidas adecuadas para aumentar su nivel de seguridad hasta el establecido en las normas vigentes.

Las **explosiones** pueden producirse en el interior del edificio, provocadas por escapes o manipulaciones inadecuadas de gas, o en el exterior, debidas a instalaciones urbanas, a acciones terroristas, a acciones de guerra, etc. Las explosiones provocan, en un lapso de tiempo muy breve, un elevado aumento de presión seguido de una subpresión. Esta rápida alternancia de fuerzas de signo contrario pueden provocar desprendimientos, disgregación e incluso el agotamiento de elementos de

hormigón armado. Al igual que los sismos, las explosiones pueden ser tenidas en cuenta en el diseño y cálculo de estructuras, con vistas a reducir sus efectos según la mayor o menor singularidad del edificio.

La gravedad de los efectos provocados por **impactos** de vehículos, elementos pesados o proyectiles depende de la velocidad y la masa del objeto que impacta, y puede ir, desde el deterioro o destrucción de elementos poco importantes para la estabilidad del edificio, hasta el colapso total de la estructura.

El daño más peligroso que pueden provocar las explosiones o los impactos es el colapso progresivo, es decir, el hundimiento de parte de la estructura o de su totalidad al fallar un elemento fundamental, a una serie de elementos en cadena.

3.1.6. Falta de adherencia entre hormigón y acero

La adherencia entre el hormigón y el acero es un factor esencial para que las armaduras ejerzan realmente la función para la que están pensadas, es decir, coser el hormigón en las traccionadas donde aquel no tiene capacidad resistente.

Existen fundamentalmente dos causas que provocan esta falta de adherencia: la insuficiente longitud de los anclajes de las barras o la existencia de sustancias nocivas en la superficie de las armaduras por falta de la limpieza necesaria.

Del primer caso hay que decir que, para que las barras se mantengan en equilibrio en el estado tensional que se requiere, es decir, trabajando a tracción, es preciso que sus extremos estén anclados a un elemento, que generalmente es el mismo hormigón. La magnitud del esfuerzo que se puede transmitir del acero al hormigón en el anclaje depende, como es sabido, de la longitud de anclaje, entre otros factores. Si aquella es insuficiente la barra no puede trabajar transmitiendo los esfuerzos de tracción o no transmite más que una parte de éstos, equivalente a lo que puede admitir el anclaje.

En cuanto a la falta de limpieza de las armaduras en el momento de ponerlas en obra, puede provocar la presencia en su superficie de sustancias que dificulten la necesaria adherencia, como grasa, aceites, pinturas, productos desencofrantes, bentonita (empleada en la ejecución de muros, pantallas o pilotes) etc.

3.2. DAÑOS CAUSADOS POR AGENTES FÍSICOS

Estos daños son producidos por acciones de tipo físico que deterioran al hormigón dando lugar a su desgaste superficial, a su pérdida de integridad o a su disgregación (erosión química). Podemos distinguir tres causas más corrientes en el origen del proceso.

3.2.1. Heladicidad

Es un fenómeno que se produce cuando el agua penetra en los poros de un material, en este caso el hormigón, y aumenta de volumen al bajar la temperatura por debajo del punto de congelación. Este aumento de volumen introduce tensiones en las capas más superficiales del hormigón llegando a fisurarlo. Si se alternan de forma continua procesos de hielo y deshielo, se produce una progresiva descamación del hormigón que puede reducir e incluso eliminar el espesor del recubrimiento de las armaduras.

3.2.2. Presión de las sales de deshielo

La sal que se utiliza en el deshielo, sobre todo en tableros de puentes y en suelos industriales, penetra por los poros al disolverse en el agua y puede llegar a generar una presión hidráulica sobre el hormigón al expandirse con las variaciones de la humedad del ambiente, provocando desprendimientos puntuales.

3.2.3. Ataque del hormigón por aguas puras

Es un proceso por el cual un agua poco ionizada es capaz de disolver el hidróxido cálcico del hormigón, provocando un aumento de la porosidad y de la permeabilidad y una disminución de la resistencia. Este fenómeno suele ser causado por aguas procedentes del deshielo en zonas de alta montaña.

3.3. DAÑOS CAUSADOS POR AGENTES QUÍMICOS

Provoca alteraciones químicas en los componentes del elemento (erosión química) los agentes y procesos más corrientes son:

3.3.1. Oxidación y corrosión de las armaduras

La oxidación de la superficie de las barras de acero de las armaduras se produce al reaccionar aquél con el oxígeno del aire. Esta oxidación superficial no es en sí misma un problema para el hormigón armado. El problema empieza cuando, por estar ciertas zonas del acero en contacto con mayores concentraciones de oxígeno, o en contacto con el agua, o por la heterogeneidad en el entorno que rodea al acero,

se producen diferencias de potencial entre zonas del material, dando lugar a un proceso de corrosión electroquímica o galvánica en el que se produce un transporte de electrones del metal, con pérdida de material con el consiguiente problema de pérdida de resistencia del elemento estructural.

La oxidación llega a producir hidróxido de hierro (herrumbre) cuando las barras se siguen mojando. La formación de herrumbre se traduce en un incremento de volumen de las armaduras, generando tensiones en el hormigón que pueden llegar a superar su resistencia a tracción dando lugar a fisuras, desprendimiento de los recubrimientos, disminución de la adherencia entre el acero y el hormigón y, en definitiva, pérdida de capacidad resistente del elemento de hormigón armado.

El comienzo del proceso de oxidación y corrosión de las armaduras puede tener diversas causas de las cuales las más corrientes son la carbonatación del hormigón y la presencia en el mismo de cloruros.

3.3.1.1. Carbonatación

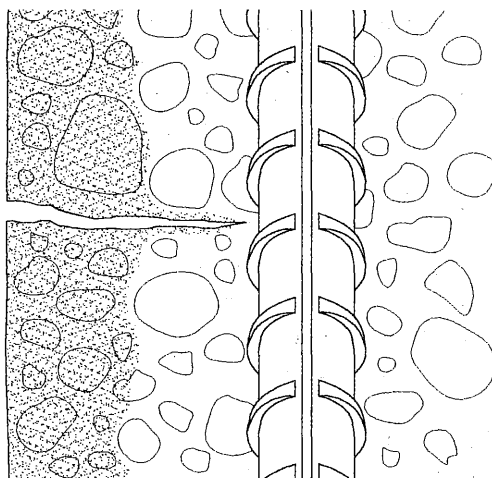
Como se ha dicho, la hidratación de las partículas de cemento da lugar a la formación de cristales de silicato cálcico hidratado fundamentalmente, pero también de hidróxido cálcico. Este componente confiere al hormigón un carácter fuertemente alcalino, con un pH superior a 12,5, que protege de la oxidación la superficie de las armaduras recubiertas de hormigón. Pero el hidróxido cálcico reacciona con la combinación de agua y dióxido de carbono contenidos en la atmósfera en un proceso químico denominado carbonatación, porque el hidróxido se convierte en carbonato, que no tiene las propiedades alcalinas de aquél. Este proceso se inicia en la superficie del hormigón y se propaga hacia el interior aunque cada vez a menor velocidad. Si los recubrimientos de las armaduras son escasos y la carbonatación alcanza al hormigón que está en contacto con ellas reduciendo el pH por debajo de 9, el acero deja de contar con la protección que tenía y se oxida más fácilmente, dando lugar al inicio del proceso de corrosión.

3.3.1.2. Corrosión por cloruros

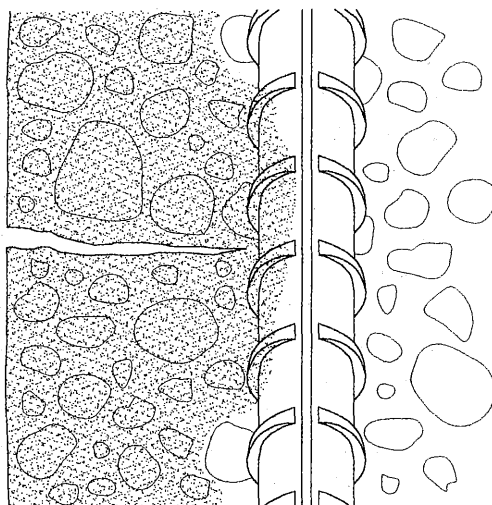
Los cloruros y otros iones en contacto con la armadura pueden producir su corrosión aunque el pH del hormigón que la recubre se mantenga en valores superiores a 9. Además, la acción nociva de los cloruros es doble, porque no sólo forma con el acero pilas eléctricas que inician la oxidación y corrosión, sino que también retienen la humedad en el hormigón por sus propiedades higroscópicas, acelerando el proceso.

Esta corrosión no es generalizada en toda la armadura como en el caso de la carbonatación del hormigón sino que se puede localizar en puntos.

CARBONATACION SUPERFICIAL
ACERO PASIVO



CARBONATACION AVANZADA
EL ACERO SE ACTIVA



CARBONATACION MUY AVANZADA



EL ACERO SE OXIDA Y AUMENTA SU VOLUMEN

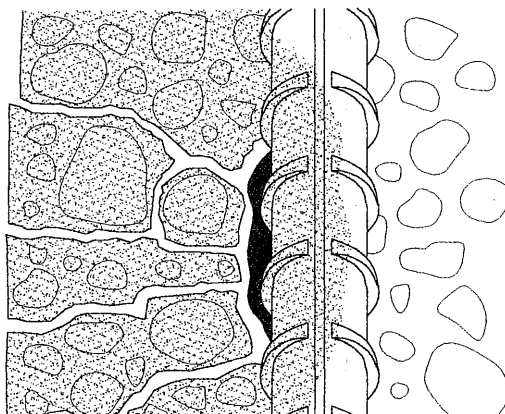


Fig. 6. 1. Oxidación y corrosión por carbonatación.

Los cloruros, como el cloruro cálcico o el cloruro sódico, pueden incorporarse al hormigón a través de algunos acelerantes de fraguado, por las sales utilizadas para el deshielo en puentes o por la atmósfera en los ambientes marinos.

3.3.2. Ataque de terrenos agresivos

En los terrenos sobre los que se asienta una estructura puede haber presencia de compuestos o sustancias nocivas que, disueltas en el agua que se filtra a través del suelo, alcancen el hormigón armado de la cimentación, atacándolo.

3.3.3. Ataque de aguas agresivas

El agua, al penetrar por los poros y microfisuras del hormigón, es vehículo de numerosos compuestos químicos que se disuelven o se forman al contacto con ella, y luego atacan químicamente a los cristales de cemento reduciendo su capacidad resistente.

El agua de lluvia arrastra numerosas partículas de compuestos químicos que flotan en el aire, como consecuencia de la contaminación atmosférica de las actuales áreas urbanas, que favorecen ambientes cada vez más agresivos. Algunos de estos compuestos forman con el agua ácidos que, en el mejor de los casos, neutralizan la alcalinidad del hormigón, acabando con la mejor protección con la que cuenta el acero y, en el peor, pueden llegar a reaccionar con algunos componentes del hormigón. Es el caso más corriente el del ácido sulfúrico (lluvia ácida) originado por los iones sulfuro (SO_2 ; SO_3) consecuencia de la contaminación urbana.

3.3.4. Otros agentes

Además de los **ácidos** formados al disolverse en agua algunas partículas contaminantes de la atmósfera, cualquier sustancia de carácter ácido contribuye, como ya se ha dicho, a desproteger las armaduras al reducir la alcalinidad del hormigón.

Los **aceites y grasas** penetran profundamente a través de los poros del hormigón y, aunque no lo atacan como los ácidos, reducen la adherencia entre el árido y la pasta de cemento afectando a la resistencia.

Algunos **alcoholes** como el metílico o el etílico, son especialmente agresivos con el hormigón, ya que pueden reaccionar formando sales solubles y disgregándolo.

3.3.5. Problemas del cemento aluminoso

La diferencia entre el cemento portland y el cemento aluminoso estriba en el proceso de fraguado y cristalización. En el primero, ya hemos dicho que se forman

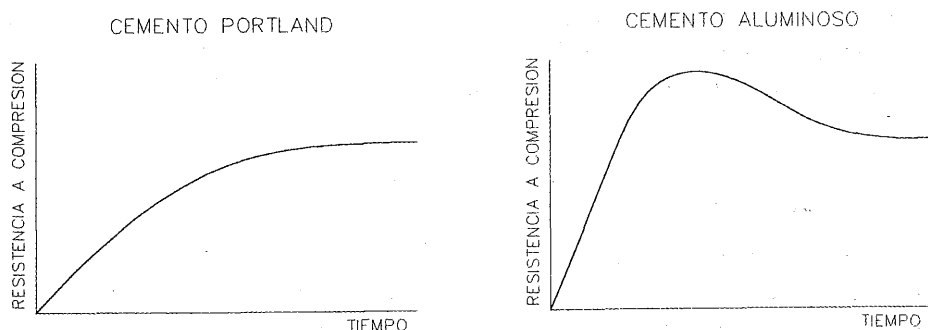


Fig. 6. 8. Gráficas de resistencia-tiempo. Para el cemento Portland y el cemento aluminoso.

cristales de silicato cálcico hidratado que crecen continuamente con el paso del tiempo adquiriendo cada vez más resistencia, incluso después del fraguado. En cambio, el cemento aluminoso forma rápidamente cristales de aluminato cálcico hidratado de gran tamaño pero parcialmente inestables, que con el tiempo se estabilizan en cristales más pequeños.

Este proceso de fraguado tiene dos consecuencias principales: por un lado, el hormigón fabricado con cemento aluminoso adquiere más rápidamente una mayor resistencia que el fabricado con cemento pórtland, lo cual contribuyó a que se generalizase su uso en muchos elementos prefabricados, sobre todo viguetas de forjados, durante los años sesenta, ya que permitía un ritmo de fabricación y de construcción más rápido. Pero por otro lado, la reducción de tamaño que experimentan los cristales con el paso del tiempo redundaba en una disminución de la resistencia del hormigón, no siempre tenida en cuenta en los cálculos del proyecto, y en un aumento de la porosidad, que favorece la oxidación de la armadura en presencia de la humedad del ambiente. Es por esto que en ambientes con cierta agresividad donde están elementos contruidos con cemento aluminoso, al cabo del tiempo, se manifiestan daños por oxidación y baja resistencia.

4. TÉCNICAS DE INSPECCIÓN

4.1. EXAMEN DE LA DOCUMENTACIÓN EXISTENTE

Previamente al inicio de la inspección de la estructura es muy conveniente recopilar toda la información ya existente sobre el proyecto de ejecución, especialmente los cálculos y planos de la estructura contrastándolos con lo realmente construido y, si los hubiere, informes sobre controles de calidad o inspecciones previamente

realizados. La usual falta de información o dificultad para encontrarla al abordar la intervención en una estructura existente, implica tener que reconstruir todo lo que se desconoce a partir de la inspección posterior.

4.2. INSPECCIÓN VISUAL

La inspección visual de la estructura debe conducir al conocimiento de su geometría y de los materiales empleados, así como al registro de los posibles daños detectables a simple vista, con el fin de establecer, con el máximo detalle, un plan o programa de inspección y ensayos, que permitan definir la estructura y su estado de conservación detalladamente. Además, en una inspección visual se pueden realizar algunas mediciones sencillas tales como desplomes, flechas, desniveles y anchos de fisuras. También se pueden colocar testigos o repetir las mediciones en una inspección posterior para comprobar la evolución de los daños de la estructura o, por el contrario, verificar su estabilización.

Conviene realizar planos de plantas, secciones y alzados en los que se ubiquen todos los daños detectados tales como grietas, fisuras, deformaciones, oxidaciones, ataques, etc, con los datos obtenidos de las mediciones, y completar esta información gráfica con la toma de fotografías e incluso la grabación en vídeo. Esto ofrece una visión global del conjunto de daños que afectan al edificio y puede ayudar mucho a deducir el, o los, procesos patológicos iniciados y sus causas o, cuando menos, arrojar luz sobre las hipótesis que se deben considerar y la dirección en la que encaminar los ensayos posteriores.

Tras una inspección visual se redacta un **informe preliminar** en el que se refleja y describe la inspección llevada a cabo incluyendo ordenadamente los datos y la información obtenida, analizándolos, exponiendo las conclusiones a las que sea posible llegar y planteando un **plan de actuación** en el que se especifiquen las inspecciones técnicas a realizar para poder llegar a conclusiones definitivas acerca del proceso patológico y las causas que lo han producido y poder establecer las actuaciones necesarias para eliminar esas causas y posteriormente reparar los daños.

4.3. INSPECCIONES TÉCNICAS

4.3.1. Conceptos

La inspección técnica, comprende un conjunto de ensayos establecidos, planificados tras la inspección visual, que permiten arrojar luz y profundizar en el conocimiento del proceso patológico que sufre una estructura, ya que ofrecen datos que no se pueden obtener con una inspección visual, por muy detallada que ésta sea. Actualmente existe una gran variedad de ensayos e instrumental de precisión para

realizarlos. Es fundamental que el manejo de este instrumental sea llevado a cabo por personal especializado, que además interprete los datos arrojados, para que el especialista en patología no obtenga conclusiones erróneas.

Los ensayos se pueden agrupar, según los efectos que acarrearán para la integridad de la estructura, en destructivos o no destructivos.

Los **ensayos no destructivos** tratan de evaluar determinadas características del hormigón armado, generalmente su resistencia, mediante procedimientos que no supongan debilitamiento alguno de la estructura o de sus elementos. Todos ellos tienen el inconveniente de la imprecisión en la evaluación que pretende llevarse a cabo. La desventaja que conlleva el empleo exclusivo de ensayos no destructivos, es la imprecisión de los resultados obtenidos. Pero a veces es necesario conocer de forma mucho más precisa la resistencia del hormigón y el margen de seguridad con el que se puede contar, haciendo necesario el empleo de **ensayos destructivos**, que pueden implicar la destrucción parcial de una estructura, o el debilitamiento de elementos de dicha estructura.

Generalmente no se lleva a cabo un único tipo de ensayo porque puede dar una visión parcial o poco completa del problema que se investiga, y se recurre a ensayos combinados, es decir, a la realización de varios ensayos diferentes de manera que se complementen mutuamente en la información que se obtiene. Es muy corriente, por ejemplo, la combinación de una esclerometría con un ensayo de ultrasonidos y la extracción y rotura de testigos.

4.3.2. Ensayos no destructivos

Se incluyen en este apartado algunos ensayos no destructivos que, no suponen debilitamiento del elemento sobre el que se practican.

4.3.2.1. Esclerometría

Es un ensayo por el cual se obtiene, de forma aproximada, la resistencia a compresión del hormigón, deduciéndola a partir de su respuesta al choque de los impactos producidos por un aparato denominada esclerómetro. Este ensayo es de ejecución fácil y rápida, pero el esclerómetro es muy sensible en su medida a múltiples factores entre los que cabe destacar la rugosidad de la superficie, la dosificación y el tipo de árido, la humedad del hormigón, la proximidad de armaduras y, especialmente, la carbonatación del hormigón, que produce un ligero endurecimiento de su superficie, dando el ensayo una medida de dureza del hormigón que no es el realmente existente en el interior de la masa. Por ello el profesor José Calavera aconseja no realizar este ensayo en hormigones de más de tres meses de edad, ya que en ese tiempo puede estimarse que “el espesor de la capa carbonatada puede superar ya los 2 mm”, a no ser que se elimine previamente esta capa una vez estimado su espesor.

Además, dado el margen de error existente en la relación entre la dureza superficial del hormigón con su resistencia a compresión, este ensayo no debe realizarse para conocer la resistencia exacta, sino para comparar la resistencia de diferentes partes de un elemento estructural, es decir, su homogeneidad, o de diferentes elementos de una misma estructura. Para su mejor utilidad, se suele correlacionar con los resultados de los ultrasonidos y con los de los testigos.

4.3.2.2. Ultrasonidos

Es un ensayo con el que se mide de forma aproximada el módulo de elasticidad del hormigón y, a partir de éste, su resistencia a compresión. Además permite comprobar la homogeneidad del hormigón y la existencia de fisuras o de coqueas en su interior. Esto se logra atravesando el hormigón por una serie de ondas o impulsos ultrasónicos, midiendo la velocidad que tardan en recorrer la distancia entre el emisor y el receptor. Respecto del ensayo realizado con esclerómetro, el realizado con equipo de ultrasonidos tiene la ventaja de no verse influido por la carbonatación ni por otros tantos factores superficiales del elemento.

4.3.2.3. Arrancamiento o “pull-out”

Es un ensayo semidestructivo por el cual se obtiene la resistencia a tracción y la consistencia del hormigón e, indirectamente, su resistencia a compresión.

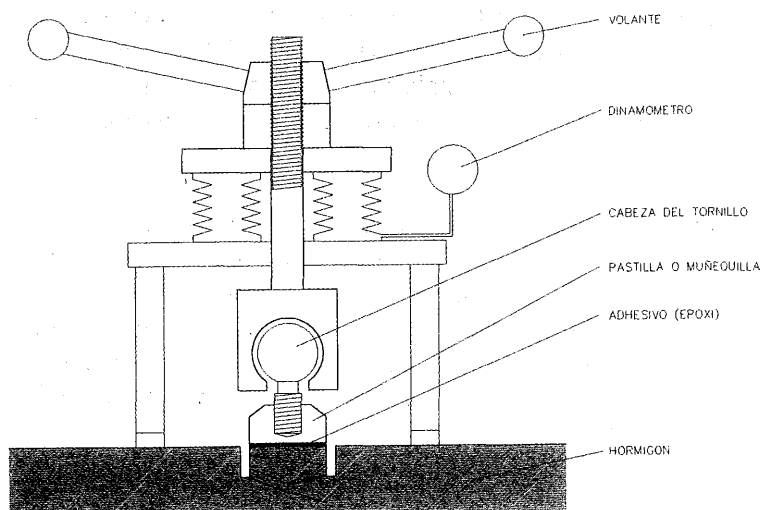


Fig. 6. 9. Arrancamiento o "Pull-Out".

Se realiza fundamentalmente en soportes y se procede, bien introduciendo antes de verter el hormigón un elemento que quedará anclado, o bien recor-tando con una corona circular una pequeña superficie hasta cierta profundi-dad para después adherirle mediante resinas epoxi una pieza metálica. En ambos casos se tira de la pieza embebida o adherida hasta arrancar dicho frag-mento de superficie del hormigón, midiendo la fuerza de tracción necesaria para llevarlo a cabo y deduciendo, mediante ábacos, la resistencia.

4.3.2.4. Penetrómetro

Mediante este ensayo, también semidestructivo y que cada vez está más en desuso, se deduce, siempre aproximadamente, la resistencia a compresión del hormigón a partir de la longitud de penetración de un clavo de dimensiones normalizadas que se dispara con una pistola calibrada.

4.3.2.5. Ondas magnéticas

Este ensayo se realiza midiendo, en diferentes puntos de la superficie del hor-migón, la alteración del campo magnético generado por una sonda electro-magnética o **pachómetro** y permite conocer la posición de las armaduras y, con menor precisión, sus diámetros y el espesor de los recubrimientos. Los errores en la medición se acentúan cuando la densidad del armado es alta o cuando el espesor del recubrimiento es muy grande, por lo que, si se necesita conocer con precisión el diámetro de las barras o el espesor de los recubri-mientos, será necesario contrastar los resultados obtenidos mediante la sonda con la medida directa practicando rozas en algunos puntos.

4.3.2.6. Medición de la profundidad de la carbonatación

Para conocer la profundidad a la que ha llegado el proceso de carbonatación en un hormigón endurecido, se lleva a cabo un ensayo semidestructivo que consis-te en practicar un pequeño corte perpendicular a la superficie del hormigón e impregnar la sección con fenoltaleína. Esta sustancia se torna color violeta en medios muy alcalinos, por lo que el espesor de hormigón carbonatado es el que no se ha teñido de violeta.

4.3.2.7. Medida del grado de corrosión de la armadura

Cuando no se sabe si el acero de las armaduras ha comenzado un proceso de corrosión, o se desconoce el riesgo de que ocurra, esto se puede deter-minar mediante equipos que miden el potencial eléctrico de aquellas. Para ello se practica en el hormigón una cala que permita conectar a la arma-dura un electrodo y se desplaza el otro electrodo por la superficie del ele-mento estructural

4.3.2.8. Examen con microscopio

El microscopio permite medir el ancho de microfisuras o fisuras que no se pueden

medir a simple vista, así como la composición mineralógica y su cristalografía.

4.3.2.9. Extensometría

La extensometría permite la medición en lesiones, de su variación dimensional, así como el seguimiento de la variabilidad de grietas y fisuras.

4.3.3. Ensayos destructivos

4.3.3.1. Extracción de testigos

Consiste en extraer de los elementos estructurales que se considere oportuno, y mediante sondas rotativas, testigos cilíndricos. Estos testigos serán posteriormente sometidos a ensayos de diversa índole en laboratorio que pueden conducir a conocer el grado de humedad o la porosidad del hormigón, la profundidad de una fisura, pero, fundamentalmente, su resistencia mediante su rotura a compresión.

Los testigos deben extraerse en puntos que sean representativos para que los datos obtenidos reflejen lo más fielmente el estado del hormigón. Además deben realizarse en zonas libres de armadura y donde el debilitamiento de su sección resistente sea lo menor posible. A pesar de esto, la extracción de testigos en algunos elementos puede suponer una considerable disminución de su sección resistente, por lo que deberá procederse a su apeo antes de realizar la operación y luego rellenar el taladro con un material que se adapte bien al hueco y que tenga una resistencia suficiente como para restituir la resistencia original del elemento. Para asegurar la fiabilidad de los resultados, se suelen extraer un mínimo de dos testigos por elemento estructural a analizar.

4.3.3.2. Extracción de muestras de armaduras

Si es necesario conocer la resistencia real del acero de las armaduras, no hay actualmente más posibilidad que extraer una muestra de las barras del hormigón para someterla a un ensayo de tracción. Para esto, habrá que proceder, si las armaduras no se han quedado a la vista por alguna circunstancia, a localizarlas con la ayuda de un pachómetro y eliminar el recubrimiento en una longitud suficiente como para poder realizar el ensayo de tracción adecuadamente. Una vez cortado el trozo de barra de muestra, se ha de restituir uniando los extremos de la armadura que ha quedado embebida con otra barra de igual diámetro soldada por solapo. Finalmente se procede a la reconstrucción de la parte de hormigón destruido con resina epoxi y microhormigón (hormigón sin árido grueso).

4.3.3.3. Pruebas de carga

Es la manera más directa de estudiar y verificar el comportamiento de una estructura, sometiéndola artificialmente al estado de carga para el que ha sido

calculada, en el caso de edificios de nueva construcción, o al cual se prevee que sea sometida, cuando el edificio no es nuevo. En este último caso, se dan dos variantes fundamentales: cuando se proyecta cambiar el uso o la actividad que se desarrolla en un edificio, sometiendo a su estructura a esfuerzos generalmente mayores a aquellos para los que estaba pensada, o cuando la estructura está deteriorada o pueda haber sufrido acciones que mermen su capacidad resistente, como incendios, terremotos, explosiones, etc.

Las pruebas de carga no deben realizarse nunca para comprobar estructuras o elementos de estructura que puedan romper de forma frágil, sin apenas deformación previa que dé aviso de la rotura inminente (es el caso de la rotura de soportes por compresión o de elementos horizontales cuando puedan colapsar por cortante antes que por flexión). No hay inconveniente, en cambio, cuando se realizan para comprobar elementos que puedan deformarse apreciablemente, avisando antes de llegar a colapsar.

Puesto que no es posible medir directamente las solicitaciones a las que están sometidos los elementos de la estructura, sólo podemos deducirlas y sacar conclusiones acerca del comportamiento y resistencia de la estructura a partir de las deformaciones que experimenta (flechas y giros)

Tanto la colocación de la carga como su retirada deben llevarse a cabo de forma progresiva, por escalones de carga, comprobando, después de cada escalón, y dejando pasar tiempo suficiente para que la estructura se estabilice, las deformaciones que se han producido. Existe una gran variedad de instrumentos de precisión para medir la magnitud de estas deformaciones. Una prueba de carga es un ensayo especialmente delicado y debe ser ejecutado y supervisado por personal especializado.

5. ANÁLISIS DE LOS DAÑOS

Después de recabar toda la información posible y relevante mediante inspecciones y ensayos, se impone un detenido análisis de la misma para determinar con precisión las causas de los daños y la evolución del proceso patológico. Si el diagnóstico es acertado, se puede abordar con posibilidades de éxito la eliminación de las causas, si es que es posible eliminarlas, o si continúan actuando, evitar que vuelva a producirse en el futuro el mismo proceso. Si se comprueba que las causas han dejado de existir o de actuar, bastará con pasar directamente a la reparación de los daños.

5.1. GRIETAS Y FISURAS EN LOS ELEMENTOS ESTRUCTURALES

Las fisuras aparecen cuando surgen tensiones (normalmente de tracción) no admi-

sibles por el material. Por tanto, la fisuración da una idea del estado tensional a que está sometido un elemento de hormigón armado. Lo importante es llegar a descubrir, entre todas las posibilidades, qué es lo que dio lugar al estado tensional que ha fisurado la pieza. La forma, el lugar y la distribución de las fisuras o de las grietas ofrecen al Arquitecto pistas fundamentales para determinar la causa principal.

5.1.1. Afogarado

Consiste en una fisuración, que se puede producir en cualquier elemento de hormigón, causada por un fuerte secado superficial en el proceso de fraguado que da lugar a una excesiva retracción hidráulica de las capas exteriores de hormigón. Estas fisuras, que alcanzan poca profundidad, se distribuyen profusa y caprichosamente por la superficie del elemento formando redes cuyas líneas se cortan en ángulo recto.

5.1.2. Fisuras por retracción hidráulica

Se producen en el proceso de secado del hormigón al perder agua la pasta de cemento de toda la masa y no sólo la superficial. Suelen producirse en elementos lineales o superficiales (en los que una o dos dimensiones de la pieza prevalecen sobre las otras: muros, losas, etc.), sobre todo si no se han proyectado las juntas de retracción necesarias. Suelen producirse paralelas entre sí y perpendicularmente a la dimensión o dimensiones principales de la pieza, que son en las que más se acusa el efecto de la retracción.

5.1.3. Fisuras por asiento plástico

Se pueden producir en elementos horizontales al asentar por gravedad el hormigón aún sin endurecer y verse impedido en este movimiento por las armaduras. Por esto se producen paralelamente a las barras de armado y es posible confundirlas con fisuras provocadas por la corrosión de estas barras.

5.1.4. Fisuras por exceso de sollicitación

5.1.4.1. Compresión

Da lugar a una fisuración irregular aunque sensiblemente paralela a la dirección del esfuerzo. El ancho de las fisuras es variable, apareciendo cuando el elemento todavía dispone de cierta reserva resistente, y haciéndose mayor cuanto más próximo se encuentra del agotamiento. Son peligrosas ya que el hundimiento de un soporte suele dar lugar al hundimiento generalizado de toda la estructura.

5.1.4.2. Tracción

Las fisuras producidas por esfuerzos de tracción aparecen en dirección perpendicular al esfuerzo. Estas fisuras pueden afectar a toda la sección de la pieza concentrándose en grietas.

5.1.4.3. Flexión

Produce en los elementos de hormigón fisuras perpendiculares a la dirección de las fibras traccionadas y de ancho variable, mayor en la superficie del elemento, que es donde el esfuerzo de tracción es mayor, y disminuyendo conforme se acerca a la fibra neutra.

5.1.4.4. Cortante

En vigas da lugar a fisuras en el alma, cercanas al apoyo e inclinadas según la dirección del antifunicular de las cargas. En losas se producen por punzonamiento, también cerca de los soportes y rodeándolos. En ambos casos se generan rápidamente y pueden producir el colapso sin dar tiempo, a su reparación por lo que son extremadamente peligrosas.

5.1.4.5. Torsión

Origina fisuras paralelas, inclinadas a 45° y rodeando las caras de la pieza helicoidalmente.

5.1.4.6. Dilatación térmica

Como ya se ha dicho, no es propiamente la dilatación térmica la que da lugar a la fisuración sino los esfuerzos provocados por los movimientos que produce y las coacciones existentes. De esto se deduce que no hay una fisuración característica de la dilatación térmica, que es la causa originaria, sino que aquella depende del tipo concreto de sollicitación que se haya provocado, remitiéndonos a los párrafos anteriores.

5.2. PANDEOS

El pandeo es la deformación de un soporte producida por una excentricidad o desviación excesiva del punto de aplicación de la resultante de las cargas respecto del eje del soporte. Esta excentricidad provoca en el elemento un momento flector. Cuando el pandeo es excesivo, se producen en el soporte la deformación y las fisuras propias de un esfuerzo flector y sintomáticas de este proceso patológico. El pandeo es pues una combinación de esfuerzo normal a compresión y momento flector que puede llegar a un punto de inestabilidad que provoque la rotura del soporte.

Es natural que inevitables imperfecciones en el proceso constructivo den lugar a pequeñas excentricidades. Excentricidades que se acentúan cuanto más esbeltas sean las proporciones del elemento.

5.3. FLECHAS

La fisuración y agrietamiento de los muros y tabiques es un síntoma característico de una deformación excesiva de elementos estructurales generalmente horizontales (vigas y losas). Estas deformaciones provocan, por incompatibilidad de movimientos, que los elementos estructurales descansen o transmitan parte de su carga a esos muros o tabiques, de manera que acaban fisurándose cuando estos esfuerzos no previstos superan su resistencia, que no suele ser muy elevada. Además, aunque la flecha excesiva se haya producido en una sola de las vigas, por el error o la causa que sea, se suele generar una “reacción en cadena” al transmitir a través del tabique parte de la carga a la viga de debajo, para lo cual no estaba pensada, con lo que a su vez se deforma demasiado, reproduciéndose el proceso sucesivamente con todas las vigas inferiores.

5.4. CORROSIÓN

Los síntomas derivados de un proceso de corrosión de las armaduras son igualmente característicos y fáciles de identificar. Las tensiones que provoca la expansión de la herrumbre fisuran el hormigón a lo largo de las barras de acero. Esta fisuración se produce paulatinamente según avanza la oxidación y corrosión de las armaduras y llega a producir el desprendimiento de los recubrimientos, especialmente de las esquinas. Además, la transformación del acero en óxido reduce la sección resistente de las barras y estribos que, en casos extremos, pueden llegar a desaparecer.

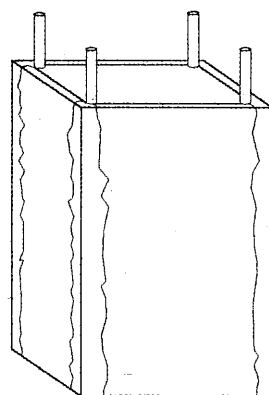


Fig. 6.10. Fisuración provocada por la oxidación y corrosión de las armaduras.

5.5. DAÑOS SUPERFICIALES

Las causas que pueden provocar daños superficiales en elementos de hormigón armado son muy numerosas, tanto físicas como químicas o biológicas.

En el caso de los ciclos de hielo y deshielo, (que provocan descamación más o menos uniforme de la superficie de hormigón), la presión provocada por la presencia de sales, y la existencia de áridos activos u otras sustancias expansivas, que puede provocar descamación o desprendimientos puntuales. (ver apartado 3.2 daños causados por agentes físicos y 3.3 daños causados por agentes químicos).

6. TÉCNICAS DE REPARACIÓN

6.1. REPARACIÓN DE GRIETAS Y FISURAS

La reparación de las grietas y fisuras de un hormigón armado tiene como fines primordiales la restitución de su capacidad resistente a tracción, la recuperación de su rigidez y monolitismo, la recuperación de la adherencia entre el acero y el hormigón, posiblemente reducida, sobre todo en fisuras paralelas a las barras de las armaduras, y la protección de las mismas frente a la oxidación y corrosión.

Cabe recordar en este punto la necesidad de estudiar detenidamente las fisuras, su evolución y su estado actual, comprobar si se han estabilizado o no, averiguar las causas que las han provocado y eliminar éstas antes de proceder a la reparación pues de lo contrario volverán a aparecer las fisuras, bien por los mismos sitios que las reparadas o bien por nuevos puntos débiles.

6.1.1. Cicatrización

Es un fenómeno por el cual pequeñas fisuras estabilizadas pueden cerrarse espontáneamente al cabo de un tiempo y se debe a la carbonatación del cemento, que da lugar a la formación de nuevos cristales que restituyen las fuerzas de adherencia mecánica entre las superficies de las fisuras. Es un fenómeno poco común en edificación y más corriente en obras hidráulicas como depósitos de agua, ya que requiere la saturación del hormigón pero sin circulación de agua por las fisuras. Pese a todo estas fisuras cicatrizadas no dejan de constituir puntos débiles del hormigón.

6.1.2. Ocratización

Es una técnica que sólo puede emplearse en fisuras pequeñas, con espesores menores de 0,2 mm. Tradicionalmente se ejecuta introduciendo a presión en las fisuras un gas de tetrafluor sílice que reacciona con los componentes del cemento produciendo una recristalización. Últimamente, en vez del gas a presión se utiliza vidrio líquido, que penetra por capilaridad con sólo aplicarlo en la superficie del hormigón.

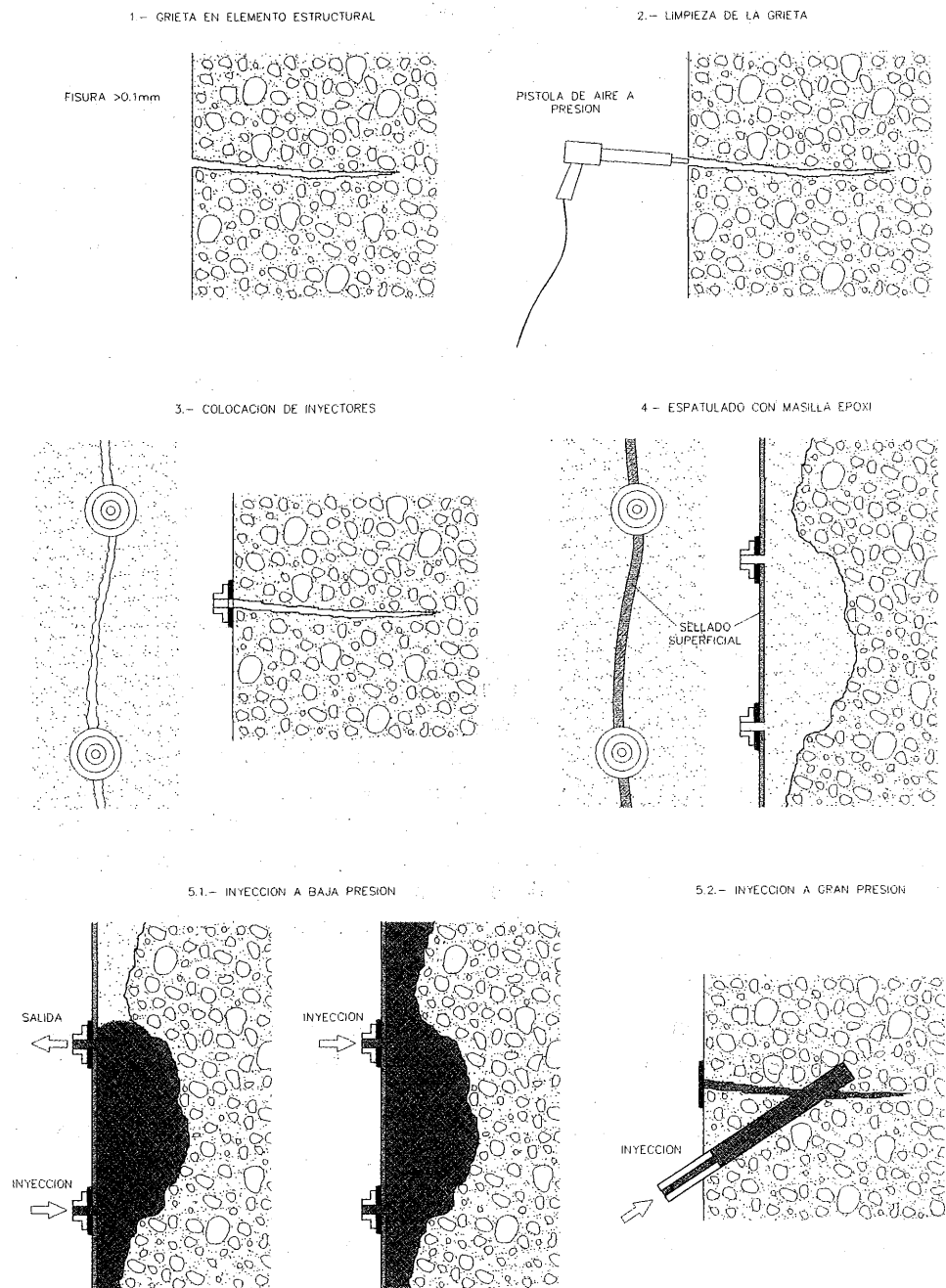


Fig. 6. 11. Reparación de fisuras por inyección de resinas a baja y alta presión.

6.1.3. Grapado

Suele llevarse a cabo en elementos superficiales como muros. No es un sistema de reparación de grietas o fisuras propiamente dicho, sino un sistema de refuerzo y recuperación de la resistencia a tracción del elemento fisurado cosiéndolo mediante grapas de acero que se introducen en taladros realizados a ambos lados de la grieta. Posteriormente se rellenan los taladros con resina epoxi o con mortero sin retracción.

No es conveniente colocar las grapas siempre con la misma orientación ya que se podría provocar una concentración de tensiones en un mismo plano. Asimismo conviene analizar y eliminar la causa de la fisura pues de lo contrario solamente se conseguiría llevar el problema a otra zona del elemento.

Si lo que se quiere realmente es cerrar las grietas o las fisuras, será preciso recurrir a un sistema de sellado paralelamente a la ejecución del grapado.

6.1.4. Inyección de resina epoxi

Es quizá el sistema más empleado en la reparación de grietas y fisuras. Requiere un ancho de la fisura mínimo de 0,1mm y que ésta permanezca seca durante el proceso. La resina puede incorporar diluyentes apropiados, si el poco espesor de la fisura puede entorpecer su penetración en toda su profundidad, y cargas inertes si la fisura es muy ancha (más de 3 mm).

Cuando sólo se pretende conseguir la impermeabilización y sellado del elemento de hormigón para proteger las armaduras, la inyección se realiza a baja presión. En este caso se procede cajeando los labios de la fisura y sellándolos, previa limpieza, con masilla epoxi en la que se introducen las boquillas de inyección separadas entre 0,3 y 1,0 m según la profundidad de la fisura. Una vez endurecido este sellado, y no antes, se procede a la inyección, mediante pistolas o equipos inyectoros, a baja presión de la resina a través de las boquillas que sirven al mismo tiempo de rebosaderos o testigos para comprobar que la resina ha rellenado bien todo el hueco existente entre dos boquillas consecutivas.

Si lo que se busca es conseguir además la restitución de la continuidad mecánica de la pieza de hormigón por adherencia entre las caras de la fisura y la resina, hay que acudir a inyecciones con presiones más altas. Para conseguir esto la introducción de la resina se tiene que producir desde el interior de la fisura a través de taladros realizados en el hormigón de hasta 0,5 m de longitud. Por lo demás el proceso es idéntico al anterior.

6.1.5. Inyección con pastas de cemento y microhormigones

El procedimiento es en todo igual a la inyección de resina epoxi, solo que lo que se inyecta aquí son pastas o lechadas de cemento y agua que pueden incorporar

algunos áridos finos, si es posible, por la dimensión de las fisuras. La relación agua/cemento empleada debe ser lo más baja posible con objeto de minimizar las retracciones y aumentar las resistencias mecánicas.

6.1.6. Sistemas postesados

Estos sistemas buscan cerrar las grietas o las fisuras mediante la aplicación de fuerzas controladas desde el exterior del elemento fisurado. Esto se logra disponiendo tirantes anclados a la pieza en puntos apropiados y tensándolos hasta conseguir cerrar la fisura. El dispositivo es permanente y requiere un estudio detenido, ya que provoca tensiones adicionales en otros puntos de la estructura. Nos remitimos aquí al apartado 6.4. (refuerzos postesados) ya que todo lo dicho en él es válido para este punto.

6.1.7. Sellado de grietas o fisuras

Estos sellados se limitan a cerrar los labios de la grieta garantizando, si es necesario, la estanquidad. Se suelen emplear materiales elásticos, generalmente de composición química orgánica, por lo que cuentan con una vida útil bastante limitada, que se adaptan a los posibles movimientos de la junta, por lo que son apropiados para sellar grietas o fisuras vivas aunque no aportan resistencia ni monolitismo al conjunto.

Se ejecuta disponiendo el material elástico en un cajeado practicado en los labios de la fisura previa limpieza. Se suele rematar recubriendo con una banda metálica de chapa plegada en forma de omega para garantizar la estanquidad.

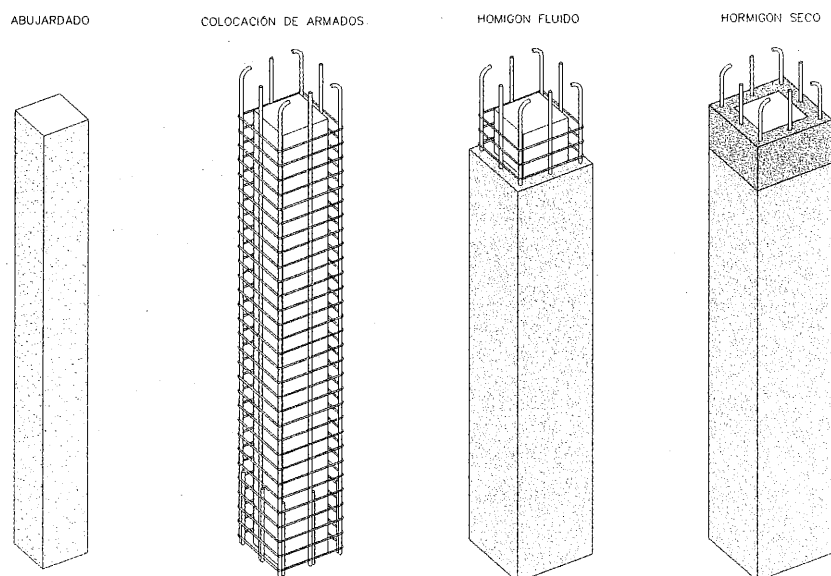


Fig. 6. 12. Refuerzo de pilar con hormigón armado.

6.2. REFUERZOS CON HORMIGÓN ARMADO

Los refuerzos realizados mediante hormigón armado son especialmente idóneos para elementos que trabajan a compresión, aunque también se pueden utilizar para reforzar elementos a flexión y a cortante.

6.2.1. Refuerzo de pilares

Consiste en recrecer el pilar en todo su perímetro con un hormigón de buena calidad con su propia armadura incorporada. En general las dimensiones de estos recrecidos son tales que se puede despreciar en el cálculo la resistencia del pilar

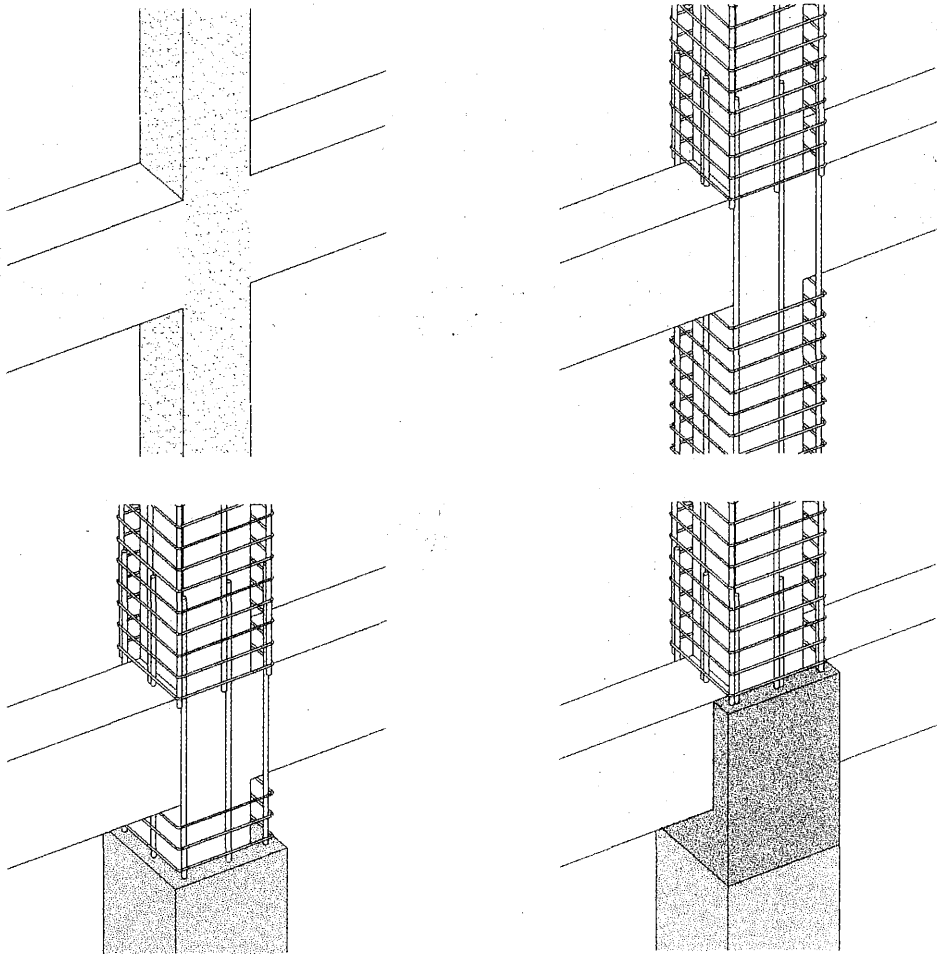


Fig. 6. 13. Detalles del paso por el forjado.



6. 1. Zunchado de un pilar de hormigón para su recrecido con hormigón armado.

existente, considerando que sólo trabaja el refuerzo. Para garantizar su contribución se deben recrecer todos los soportes que queden debajo del afectado y en toda la altura del soporte.

A pesar del efecto favorable que produce la retracción del hormigón de recrecido con vistas a mejorar la adherencia y el trabajo conjunto de los dos hormigones, es preciso garantizar esta adherencia preparando convenientemente la superficie del soporte. Esta preparación se puede llevar a cabo de diversas maneras:

- Se puede picar el hormigón viejo para eliminar la capa superficial de lechada, más débil y en la que suelen depositarse todo tipo de impurezas, y para aumentar la rugosidad.
- Se puede realizar un cajeado del soporte eliminando hormigón viejo en bandas de unos tres centímetros de profundidad alternadas con bandas sin picar, de modo que los dos hormigones, el viejo y el nuevo queden machihembrados.
- Se puede hacer uso de adhesivos como resinas epoxi, para lo cual hay que proceder igualmente al picado de toda la superficie del soporte. En este caso hay que asegurarse de que el tiempo de empleo de la resina que se utilice permita la colocación de las armaduras del refuerzo, del encofrado y del hormigonado.

El hormigonado puede realizarse de forma tradicional o con hormigón proyectado. El

punto más delicado de hormigonar es la franja superior del soporte que queda pegada a la cara inferior del forjado. Debe llevarse a cabo con un mortero ligeramente expansivo para que se produzca la entrada en carga del refuerzo, pero cuando éste haya alcanzado una resistencia mínima necesaria, a los 28 días.

Si lo que interesa es mejorar o aprovechar la resistencia del elemento existente para evitar problemas derivados de un aumento excesivo de sus dimensiones, se puede recurrir al zunchado del soporte, aumentando considerablemente la cuantía de armadura transversal del refuerzo. El zunchado permite reducir el espesor del recrecido pero no debe utilizarse en soportes esbeltos con problemas de pandeo ni tampoco en algunos de los pilares de un pórtico sin zunchar el resto, debido a las distorsiones que puede introducir en los esfuerzos de los demás elementos del pórtico, a no ser que se tengan en cuenta en los cálculos.

No debe olvidarse la posible necesidad de apearse o descargar el soporte afectado durante la ejecución del refuerzo en caso de que pueda existir riesgo de agotamiento del mismo.

6.2.2. Refuerzo de vigas

Puede ser necesario para aumentar su resistencia frente a momento flector o frente a esfuerzo cortante.

En el primer caso, es necesario la introducción de armaduras longitudinales de tracción en la cara inferior de la viga, en el caso de que la armadura existente sea insuficiente y, más raramente, de armaduras de compresión en la cara superior, en caso de agotamiento del hormigón del bloque comprimido.

Se pueden considerar dos sistemas para introducir armaduras longitudinales de refuerzo en la viga:

- Mediante un recrecido del canto de la viga que incorpore la armadura de refuerzo. En este caso deberán colocarse nuevos estribos que hagan frente a las tensiones rasantes que aparecerán entre la viga y el recrecido, bien soldándolos a los estribos existentes, bien haciéndolos rodear toda la viga mediante unos taladros practicados en el forjado. Asimismo debe reforzarse la adherencia entre los dos hormigones para garantizar el trabajo solidario y conjunto, preparando la superficie del hormigón viejo mediante técnicas idénticas a las explicadas para el refuerzo de soportes (picado, cajeado, empleo de resinas epoxi). Esta técnica sólo permite el refuerzo de armaduras de tracción.
- Mediante la introducción de la armadura de refuerzo en la masa de hormigón de la viga abriendo surcos longitudinales que se rellenarán con mortero epoxi o con un mortero de alta resistencia y ligeramente

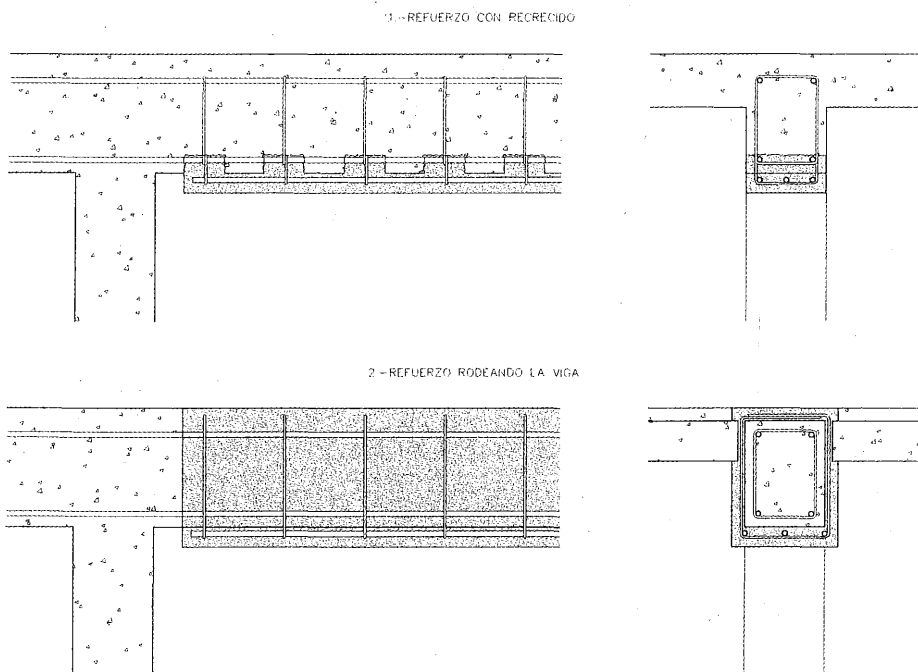


Fig. 6. 14. Refuerzo de vigas frente a momento.

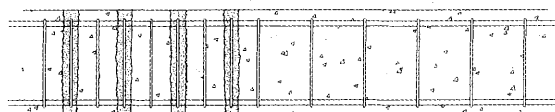


Fig. 6. 15. Refuerzo de vigas frente a cortante.

expansivo. Esta técnica permite el refuerzo, tanto de armaduras de tracción como de armaduras de compresión.

Si lo que hace falta es reforzar la viga frente a esfuerzo cortante, se pueden introducir estribos practicando surcos que rodeen toda la pieza, soldándolos a la armadura longitudinal y rellenando como en el caso anterior.

Es imprescindible apeaar la viga, y deseable descargarla, para llevar a cabo la ejecución del refuerzo.

6.2.3. Refuerzo de forjados

Se realizan aumentando la capacidad de la capa de compresión, vertiendo sobre el forjado una nueva capa de hormigón con mallazo de reparto. Es preciso garantizar la transmisión de los esfuerzos rasantes entre el forjado y la nueva capa de compresión, bien introduciendo conectores entre los dos hormigones o bien por adherencia entre las dos superficies.

6.3. REFUERZOS METÁLICOS

El refuerzo de elementos de hormigón armado puede realizarse también mediante perfiles laminados de acero, pero se trata de una operación mucho más delicada que el refuerzo con hormigón, que requiere un detallado análisis de la solución de los nudos y de la manera de hacer entrar en carga al refuerzo, y una cuidadosa ejecución para que realmente funcione como ha sido pensado.

6.3.1. Refuerzo de soportes

Para el refuerzo de soportes con perfiles metálicos se utiliza angulares en sus esquinas que se sujetan entre sí por medio de presillas soldadas. Debe garantizarse la transmisión de esfuerzos al nuevo elemento mediante un capitel y una base en los extremos del refuerzo. Éstos se unirán a las caras de los forjados o a las vigas que acometen al pilar mediante un material resistente a compresión y de escasa o nula retracción, como puede ser una masilla epoxi.

Habrà que reforzar todos los pilares afectados y dar continuidad a la estructura, atravesando los forjados con palastros o barras de acero soldadas a los refuerzos en las zonas de bovedillas o en cuatro puntos, si está macizado de hormigón alrededor del pilar. Si no se da continuidad a la estructura de refuerzo y se confía la transmisión de esfuerzos al hormigón del forjado, de la losa o de las vigas, hay que prever posibles problemas de punzonamiento o de plastificación del hormigón en estos puntos. También puede ser efectivo anclar los perfiles al propio soporte para mejorar el trabajo conjunto.

PREPARACION DEL SOPORTE



EMPRESILLADO Y COLOCACION DE PERFILES

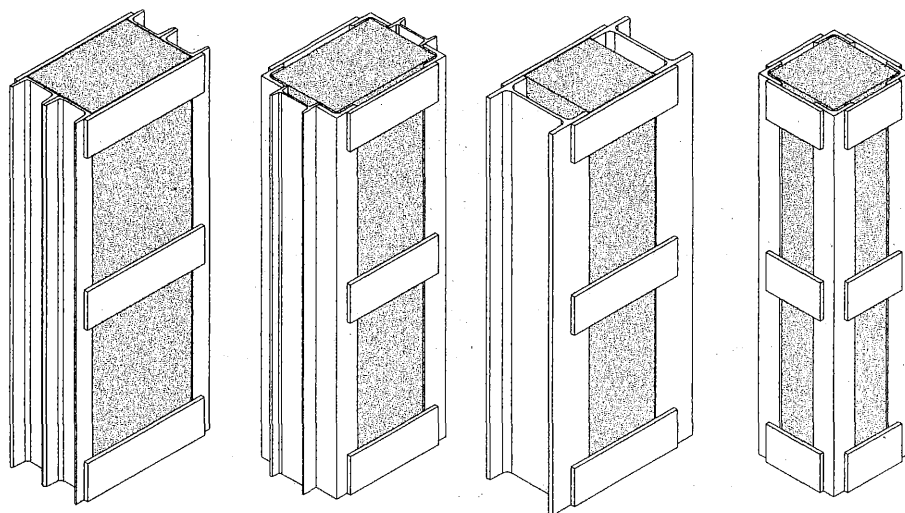
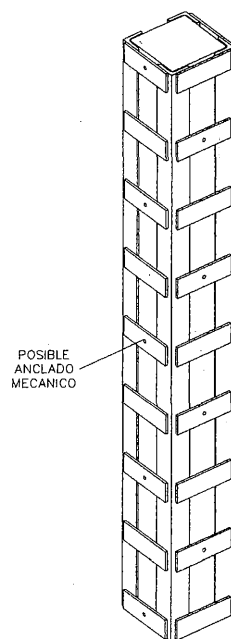


Fig. 6. 16. Refuerzo de pilar con perfiles metálicos.

En la medida en que no se descarguen los pilares durante la ejecución del refuerzo, la entrada en carga de éste es más deficiente pudiendo llegar a producirse por la deformación que produce la fluencia del pilar de hormigón o por agotamiento definitivo de éste, lo cual no es deseable.

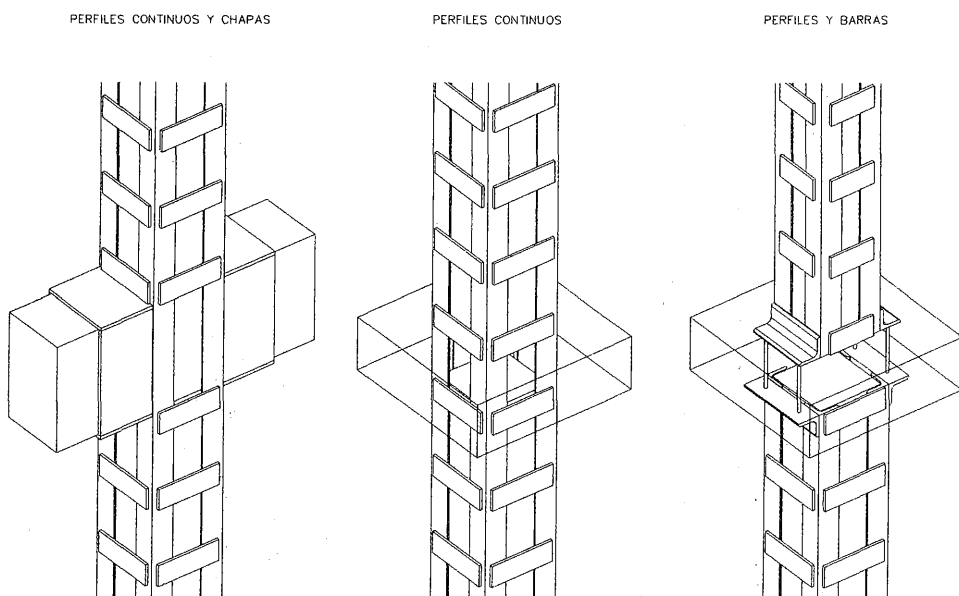


Fig. 6. 17. Soluciones de continuidad en el refuerzo de pilares.

6.3.2. Refuerzo de vigas

Se lleva a cabo aumentando la sección resistente de la viga mediante perfiles de acero. Se puede realizar de diversas maneras, pero el problema siempre reside en lograr un trabajo conjunto de la viga y del refuerzo y, al igual que en el caso de los pilares, si no se descarga la viga antes del proceso la entrada en carga del refuerzo sólo se producirá al deformarse todavía más la viga.

Un posible sistema es adosar a la cara inferior de la viga un perfil en “U”, o bien angulares en las esquinas, y atar este refuerzo a la viga mediante presillas que atraviesen el forjado.

Otro sistema que se puede utilizar con bastante éxito si se proyecta y ejecuta correctamente, es el refuerzo con bandas de acero en el que el trabajo solidario de las dos partes se garantiza por la extraordinaria adherencia que proporcionan las resinas epoxi. Esta solución requiere un cuidadoso estudio de la formulación epoxi apropiada para

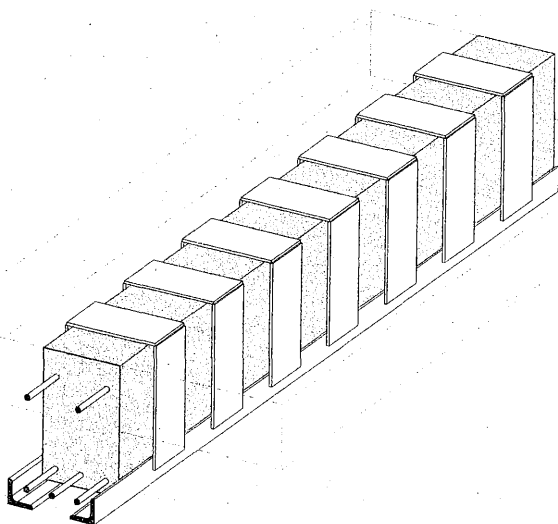


Fig. 6. 18. Refuerzo de vigas con angulares y presillas.

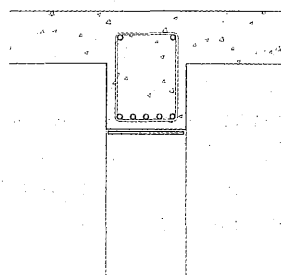
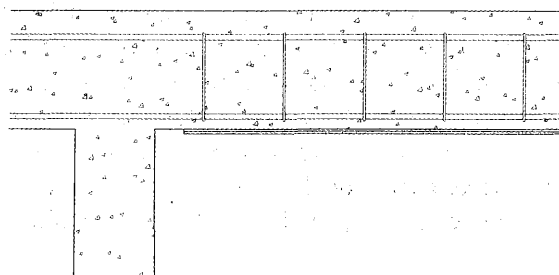


Fig. 6. 19. Refuerzo de vigas con chapa de acero adherida.

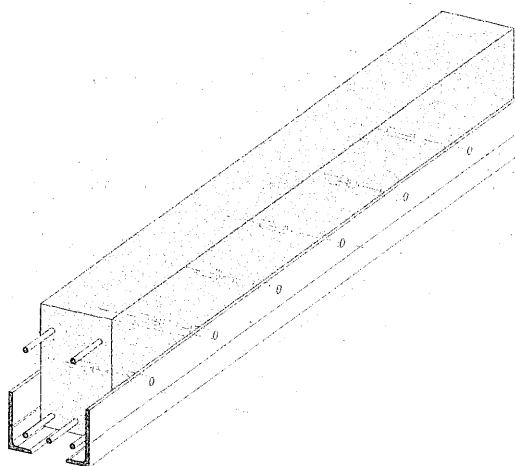


Fig. 6. 20. Refuerzo de vigas con angulares y anclajes.

cada caso, una ejecución con personal especializado, una limpieza meticulosa de las superficies a encolar, así como su planidad (sobretudo de los paramentos del hormigón) un espesor adecuado del adhesivo, un tiempo óptimo de aplicación y un tiempo de endurecimiento de al menos siete días, durante los cuales se debe mantener una presión entre los dos elementos que se encolan.

En este caso, también se puede asegurar el funcionamiento conjunto mediante el anclaje mecánico adicional de las pletinas metálicas a la viga.

Por último, un sistema también válido para losas de forjados se obtiene convirtiendo la sección de hormigón existente en una sección mixta mediante, un perfil metálico y conectores.

6.4. REFUERZOS POSTESADOS

La técnica del postesado permite, mediante la introducción de fuerzas controladas en el lugar apropiado, reducir determinadas tensiones a las que no puede hacer frente el material por sí solo, a costa de aumentar otras que pueden ser resistidas de manera menos problemática.

Los refuerzos postesados son especialmente útiles en algunos casos en los que otro tipo de refuerzos, como los ya vistos de hormigón armado o perfilería metálica, no son tan eficaces. También tiene sus inconvenientes: son más caros y requieren una cuidadosa ejecución y, sobre todo, un detenido estudio del estado de la estructura, de su capacidad para admitir los esfuerzos adicionales del postesado, de los posibles efectos secundarios desfavorables que estas fuerzas puedan provocar en otros lugares de la estructura, de las pérdidas de tensión por

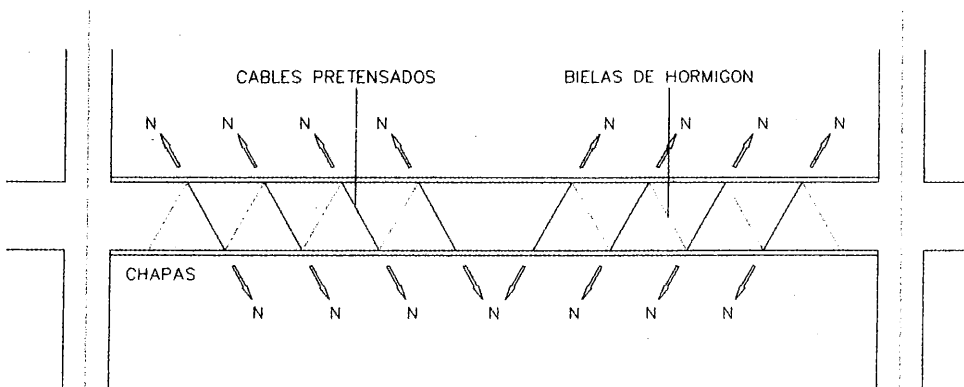
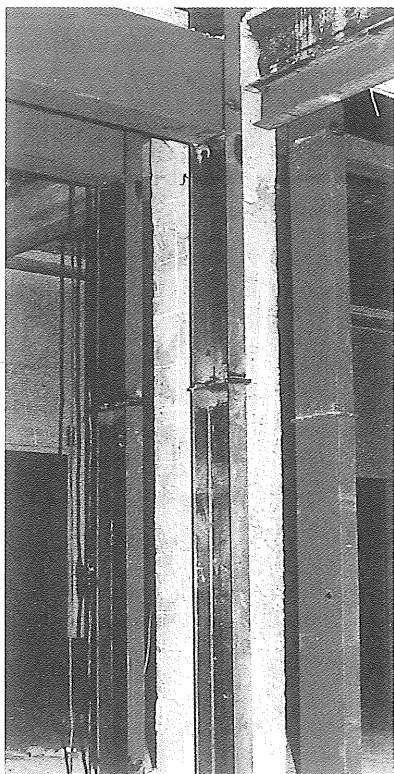


Fig. 6.16. Postesado mediante celosía



6.2./6.3./6.4. Refuerzo de una estructura de hormigón armado y forjados unidireccionales mediante perfiles metálicos. El esfuerzo se realiza en los forjados, vigas, pilares y cimentación.

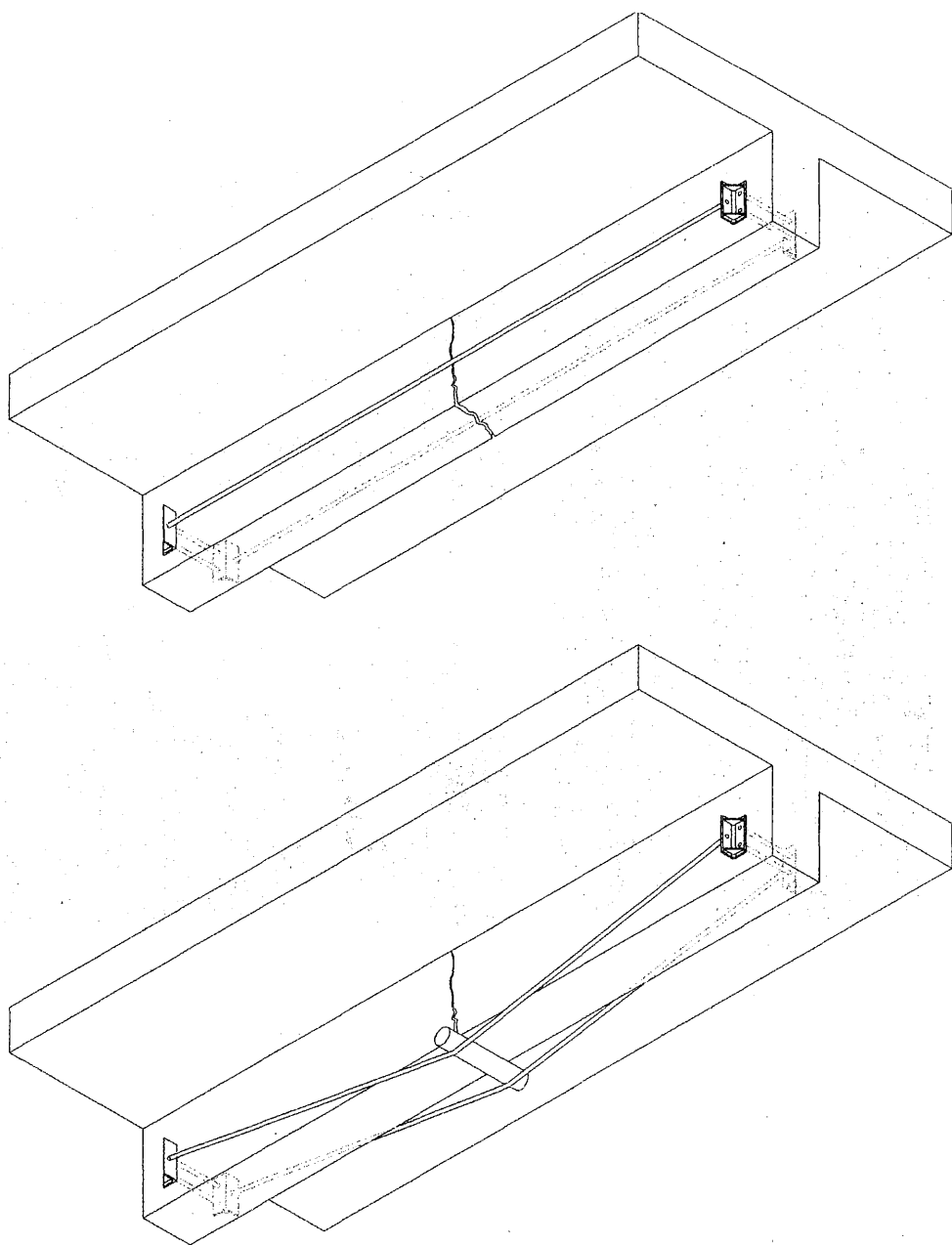


Fig. 6. 22. Postensado mediante tirantes y tubo.

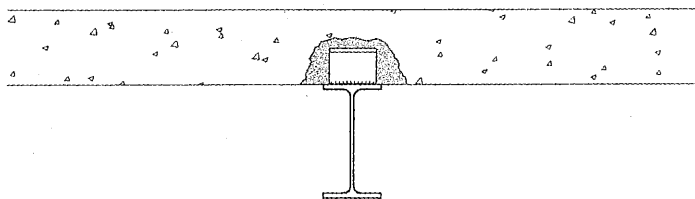


Fig. 6.21. Refuerzo de losas mediante la creación de una sección mixta de hormigón y acero.

fluencia del hormigón o por relajación del acero, y del diseño de las piezas, de los nudos y de los anclajes.

Su aplicación más corriente es en el caso de elementos horizontales, vigas o losas, excesivamente deformados, sobre todo cuando no existe la posibilidad de descargarlos. En este caso se introducen o adosan, mediante diversos sistemas, los cables que se tensarán a continuación debiendo adoptar éstos un trazado lo más parecido posible al funicular de las cargas (o al perfil de la ley de momentos). De esta manera los cables o barras postesadas pasan a soportar las tracciones que antes soportaban insuficientemente las armaduras del elemento estructural pudiendo llegar, si se aplica la fuerza necesaria, a cerrar las fisuras que se hubiesen abierto en el hormigón, y trabajando éste exclusivamente a compresión. Previamente al tensado de los cables es conveniente sellar las fisuras con inyección si existe la posibilidad de que lleguen a formar planos de deslizamiento en el momento de aplicar las fuerzas de tensado.

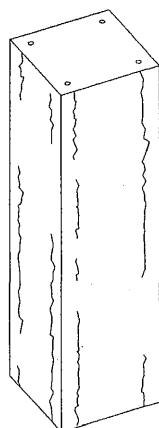
6.5. REPARACIÓN DE OXIDACIÓN Y CORROSIÓN DE ARMADURAS

La mayor o menor dificultad que se puede encontrar al reparar los daños provocados en una pieza de hormigón por la corrosión de sus armaduras, depende principalmente de la accesibilidad de éstas y de la medida en que se han visto afectadas por el proceso de oxidación y corrosión.

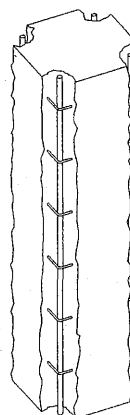
La reparación comienza por evaluar la gravedad de los daños producidos, para garantizar la resistencia y estabilidad de la estructura durante los trabajos de reparación. Puede ser necesario apuntalar la estructura o, si los daños son mínimos, no requerir especiales medidas de seguridad.

El siguiente paso es eliminar el hormigón fisurado o deteriorado por la corrosión del acero, y el hormigón alrededor y en toda la longitud de las partes corroídas de las barras hasta alcanzar la parte sana. El picado del hormigón debe permitir, a continuación, comprobar la posible existencia de fisuras en la pieza, que deberán ser selladas inyectando una resina epoxi, y limpiar completamente la herrumbre en toda la superficie de la armadura afectada por la corrosión. Esta limpieza es esen-

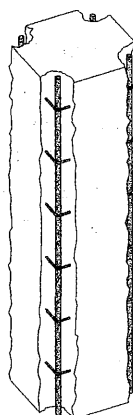
GRIETAS



SANEADO MEDIANTE REPICADO



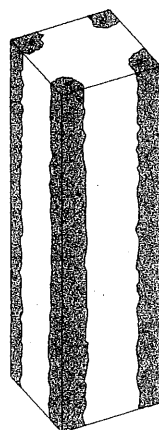
DESOXIDACION Y PROTECCION DE ARMADURAS



CAPA DE ADHESIVO



MORTERO DE REPARACION



RECUBRIMIENTO

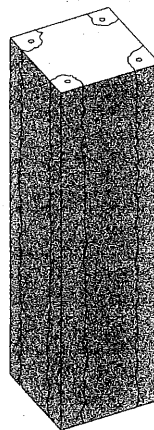
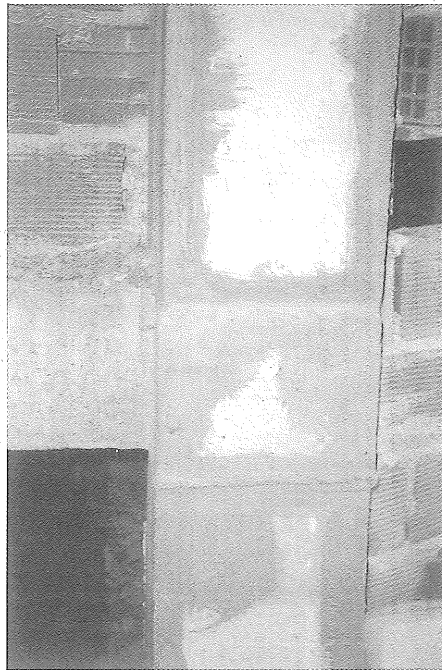


Fig. 6. 23. Reparación de oxidación y corrosión de armaduras.

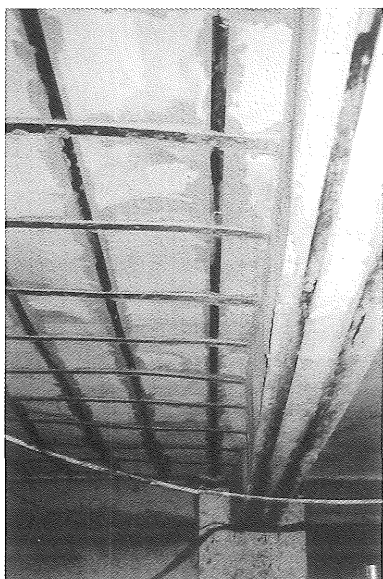
cial para garantizar la posterior adherencia de las barras.

Llegado el momento de restaurar las armaduras habrá que evaluar la pérdida de capacidad resistente que han sufrido, lo que depende directamente de la pérdida de sección del material. Si ésta ha sido mínima y afecta de forma despreciable a la resistencia de la pieza de hormigón, bastará con rellenar para restituir la sección original de la pieza, que constituye el siguiente paso. Si la pérdida de sección alcanza el 15% ó el 25% de la sección original, será necesario, bien reforzar la armadura añadiendo una nueva barra atada o soldada a la existente o directamente sustituirla por otra, cortándola y soldando a los extremos sanos los de la nueva, con una longitud de solape adecuada.

Como se ha dicho, el proceso concluye con la restitución de la sección original de la pieza de hormigón rellenando lo que se ha picado con un material de reparación, como puede ser un hormigón proyectado, un mortero de alta resistencia con carácter ligeramente expansivo, un mortero epoxídico, etc. Previamente se habrá aplicado a la superficie picada del hormigón y a las armaduras una capa de resina epoxi, tanto para garantizar la adherencia con el nuevo material de relleno como



6. 5. Acabado final de una reparación mediante morteros especiales.



6.6/6.7/6.8. Refuerzo de losa y viga de hormigón armado mediante CFRP y resinas epoxídicas.

para proteger al acero de una nueva corrosión, contando con el tiempo necesario para aplicar el relleno antes de que el adhesivo endurezca.

Adicionalmente puede considerarse la posibilidad de aplicar una protección superficial a la parte reparada mediante pinturas impermeabilizantes o hidrófugas, pero no suele ser necesario salvo en caso de una excesiva agresividad del ambiente.

6.6. REPARACIÓN Y REFUERZO CON MATERIALES COMPUESTOS

Los materiales compuestos (composites) son materiales que se fabrican con objeto de mejorar las propiedades que sus constituyentes poseen por separado consiguiendo un nuevo material con mejores prestaciones. Podemos considerar como material compuesto el hormigón armado, que une la forma óptima de trabajar del acero (a tracción) con la del hormigón (a compresión) creando así un nuevo material con mayor y mejor uso que cada uno de sus constituyentes por separado.

En la actualidad existen materiales formados por fibras y matrices que tienen una utilidad muy directa en la reparación y refuerzo de estructuras de hormigón armado como es el caso de la fibra de carbono con matriz polimérica denominado CFRP (siglas en inglés de fibra de carbono reforzada con polímeros).

Las ventajas de este material:

- Menor peso.
- Mayor resistencia.
- Facilidad de manejo.
- Longitud ilimitada.
- Medios auxiliares requeridos elementales.

Su uso más frecuente es:

- Reparación de piezas con armadura corroída.
- Suplemento de armado existente para mejorar el comportamiento estructural.
- Relación de pretensados y postesados.
- Zunchados de piezas verticales.

Su aplicación se realiza mediante pegado con resinas y ocasionalmente anclado con medios mecánicos.

BIBLIOGRAFÍA

- Alonso, J. (1996). *El mundo de la cultura*. Madrid: Alianza.
- Alonso, J. (1997). *El mundo de la cultura*. Madrid: Alianza.
- Alonso, J. (1998). *El mundo de la cultura*. Madrid: Alianza.
- Alonso, J. (1999). *El mundo de la cultura*. Madrid: Alianza.
- Alonso, J. (2000). *El mundo de la cultura*. Madrid: Alianza.
- Alonso, J. (2001). *El mundo de la cultura*. Madrid: Alianza.
- Alonso, J. (2002). *El mundo de la cultura*. Madrid: Alianza.
- Alonso, J. (2003). *El mundo de la cultura*. Madrid: Alianza.
- Alonso, J. (2004). *El mundo de la cultura*. Madrid: Alianza.
- Alonso, J. (2005). *El mundo de la cultura*. Madrid: Alianza.
- Alonso, J. (2006). *El mundo de la cultura*. Madrid: Alianza.
- Alonso, J. (2007). *El mundo de la cultura*. Madrid: Alianza.
- Alonso, J. (2008). *El mundo de la cultura*. Madrid: Alianza.
- Alonso, J. (2009). *El mundo de la cultura*. Madrid: Alianza.
- Alonso, J. (2010). *El mundo de la cultura*. Madrid: Alianza.
- Alonso, J. (2011). *El mundo de la cultura*. Madrid: Alianza.
- Alonso, J. (2012). *El mundo de la cultura*. Madrid: Alianza.
- Alonso, J. (2013). *El mundo de la cultura*. Madrid: Alianza.
- Alonso, J. (2014). *El mundo de la cultura*. Madrid: Alianza.
- Alonso, J. (2015). *El mundo de la cultura*. Madrid: Alianza.
- Alonso, J. (2016). *El mundo de la cultura*. Madrid: Alianza.
- Alonso, J. (2017). *El mundo de la cultura*. Madrid: Alianza.
- Alonso, J. (2018). *El mundo de la cultura*. Madrid: Alianza.
- Alonso, J. (2019). *El mundo de la cultura*. Madrid: Alianza.
- Alonso, J. (2020). *El mundo de la cultura*. Madrid: Alianza.
- Alonso, J. (2021). *El mundo de la cultura*. Madrid: Alianza.
- Alonso, J. (2022). *El mundo de la cultura*. Madrid: Alianza.
- Alonso, J. (2023). *El mundo de la cultura*. Madrid: Alianza.
- Alonso, J. (2024). *El mundo de la cultura*. Madrid: Alianza.
- Alonso, J. (2025). *El mundo de la cultura*. Madrid: Alianza.

- A. BAGTIONI G. GUARNEIRO, "La rehabilitación de edificios urbanos", Ed. G.G., 1988.
- ADELL ARGILÉS, Josep María. "Arquitectura de ladrillos del siglo XIX. Técnica y forma". Fundación Universidad Empresa, Madrid, 1986.
"La fábrica armada". Ed. Munilla- Lería. 2000.
- ARGÜELLES ÁLVAREZ, Ramón y ARRIAGA MARTITEGUI, Francisco; Estructuras de madera. Diseño y cálculo; A.I.T.I.M. (Asociación de Investigación Técnica de las Industrias de la Madera y Corcho), Madrid, 1996.
- BAILS, Benito. Tomo IX, Parte I que trata de la Arquitectura Civil. Imprenta de la Viuda D. Joaquín Ibarra (segunda edición), Madrid, 1796. Edición facsímil, Colegio de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de Murcia, Murcia, 1983
- CALAVERA RUIZ, José; Patología de estructuras de hormigón armado y pretensado; Tomos 1 y 2; Instituto Técnico de Materiales y Construcciones (INTE-MAC).
- CALAVERA RUIZ, José; Tipología de fisuras en el hormigón armado; Comisión de Cultura de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Las Palmas, 1990.
- CARBONELL DE MASY, Manuel; Protección y reparación de estructuras de hormigón; Ediciones Omega, Barcelona, 1996.
- CASINELLO PÉREZ, Fernando; Construcción. Carpintería; Editorial Rueda, Madrid, 1973.
- CASINELLO PÉREZ, Fernando; Construcción. Hormigonería; Editorial Rueda, Madrid, 1974.
- ETSA Valladolid, Dep. de Construcción, "Patología de fachadas urbanas", Universidad de Valladolid, 1987.
- DCTA. "Tratado de rehabilitación". Tomo 4, "Patología y Técnica de intervención. Elementos Estructurales". Ed. Munilla-Lería. 1999.
- FERNÁNDEZ CÁNOVAS, Manuel; Patología y terapéutica del hormigón armado; Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Servicio de Publicaciones, Madrid, 1994.
- FRIEDRICH EICHLER, "Patología de la Construcción", Ed. Blume, 1979.
- LÓPEZ COLLADO, Gabriel "Ruinas en Construcciones antiguas", MOPU, 1976.
- H.J. ELDRIGE, "Defectos comunes", Ed. G.G., 1982.
- JOHN TRILL Y JACK T. BOWYER, "El caso de la esquina rota y otros problemas constructivos", Ed. G.G., 1981.
"Curso de mecánica y Tecnología en los edificios antiguos", C.O.A.M., 1987.
"Curso de rehabilitación" (10 tomos), C.O.A.M., 1987.
- LOZANO APOLO, Gerónimo y LOZANO MARTÍNEZ-LUENGAS, Alfonso; Curso de técnicas de intervención en el patrimonio arquitectónico; Tomo 1, Consultores Técnicos de Construcción, Gijón, 1995.

- LYALL ADDLESON, "Fallos en los edificios", Consejo General de Aparejadores y Arq. Técnicos, 1982.
"Lesiones en los edificios: Síntomas, causas, reparación" (2 tomas), CEAC, 1980.
- MEDINA GALLEGO, Gonzalo; Pavimentos de madera, A.I.T.I.M. (Asociación de Investigación Técnica de las Industrias de la Madera y Corcho), Madrid, 1997.
- de MIGUEL, Pedro; "¡Alto a la carcinoma!", en Casa & Campo. Casas restauradas, Extra nº 10, Globus Comunicación S.A., Madrid.
- MONJO CARRIÓN, Juan, "Patología de cerramientos y acabados arquitectónicos", Ed. Munilla-Lería, 1994.
- NUÑEZ OLÍAS, Julián; Recalces, Kronsa, Madrid, 1974.
- PERAZA SÁNCHEZ, Fernando; Patología y protección de la madera, A.I.T.I.M. (Asociación de Investigación Técnica de las Industrias de la Madera y Corcho), Madrid, 1994.
- PERMANYER I PINTOR, Eduard; "Soluciones constructivas para la rehabilitación de viviendas de alta montaña", I.T.E.C. (Institut de Tecnologia de la Construcció de Catalunya), Barcelona, 1986.
- RODRÍGUEZ BARREAL, Jose Antonio y ARRIAGA MARTITEGUI, Francisco; Patología, tratamiento y consolidación de la madera puesta en obra; C.I.C.Y.T., 1989.
- RODRÍGUEZ ORTÍZ, Jose María; Curso de rehabilitación, Tomo 4, Servicio de Publicaciones del Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid, Madrid, 1985.
- T. STAMBOLOV Y J.R. J. VAN ASPEREN DE BOER. "El deterioro y la conservación de materiales porosos de construcción en monumentos", U.N.A.M., 1984.
- Varios autores; Curso de patología. Conservación y restauración de edificios; Tomo 1, Servicio de Publicaciones del Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid, Madrid, 1991.
- Varios autores; Patología y técnicas de intervención. Elementos estructurales; Tomo 3, Departamento de Construcción y Tecnología Arquitectónicas. Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid, Madrid, 1998.
- Varios autores; Casas de madera, A.I.T.I.M. (Asociación de Investigación Técnica de las Industrias de la Madera y Corcho), Madrid, 1995.
- Varios autores; Curso de patología. Conservación y restauración de edificios, Tomo 2, Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid, Madrid, 1991.
- Varios autores; Curso de rehabilitación, Tomo 5, Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid, Madrid.
- Varios autores; Especies de madera para carpintería, construcción y mobiliario; A.I.T.I.M. (Asociación de Investigación Técnica de las Industrias de la Madera y Corcho), Madrid, 1997.

- Varios autores; Guía de la madera; A.I.T.I.M. (Asociación de Investigación Técnica de las Industrias de la Madera y Corcho), Madrid, 1994.
- Varios autores; PROTECMA. Revista de Protección de la Madera, nº 1, Esinal Ediciones, Zarautz, 1998.
- Varios autores; Curso de patología. Conservación y restauración de edificios; Tomo 2, Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid, 1991.
- Varios autores; Curso de rehabilitación 5. La estructura; Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid.
- Hormigón. Sanear - Reparar – Proteger; Sika, Madrid, 1985.